

UNIVERZITA KARLOVA V PRAZE

Přírodovědecká fakulta

Katedra aplikované geoinformatiky a kartografie

Studijní program: Geografie (navazující magisterské studium)

Studijní obor: Kartografie a geoinformatika



Bc. Dennis DVOŘÁK

KALIBRACE UAV LASEROVÉHO SKENOVÁNÍ

CALIBRATION PARAMETERS OF THE UAV LASER SCANNING

Diplomová práce

Vedoucí práce: Ing. Markéta Potůčková, Ph.D.

Praha 2021

Vysoká škola: Univerzita Karlova

Fakulta: Přírodovědecká

Katedra: Aplikované geoinformatika a kartografie

Školní rok: 2020/2021

Zadání diplomové práce

Jméno: Dennis Dvořák

Studijní obor: Kartografie a geoinformatika

Název tématu: Kalibrace UAV laserového skenování

Zásady pro vypracování

Prostorová přesnost bodů získaných z leteckého laserového skenování je nejvíce ovlivněna parametry použitého GNSS přijímače, IMU jednotky a parametry vlastního letu. Důležitou roli hraje přesnost tzv. kalibrace, tj. určení prvků transformace mezi souřadnicovými systémy vlastní skenovací jednotky, IMU a pozicí fázového centra GNSS antény. Diplomová práce se zaměří na metody ověření přesnosti kalibrace IMU/GNSS jednotky. Porovnává posuny a rotace bodového mračka pořízeného LiDARem (laserový skener RIEGL miniVUX-1UAV) ve vztahu ke kalibračním prvkům daným výrobcem. Výsledky hodnotí pomocí vypočítaných směrodatných odchylek a polohových diferencí odpovídajících si ploch naskenovaných v různých pásích v surovém bodovém mračnu, případně porovnáním bodových mračen získaných jinou metodou. Další metodou ověření bude porovnání s kontrolními body zaměřenými geodetickými metodami.

Seznam odborné literatury:

CLAUSEN, P., REHAK, M., SKALOUD J. (2016): UAV Sensor Orientation with Pre-calibrated Redundant IMU/GNSS Observations: Preliminary Results. *DGPF*. Bern, Schweiz: DGPF, 2016. č. 25. ISSN 2512-2819.

CUCCI, D. A., REHAK, M., SKALOUD, J. (2017): Bundle adjustment with raw inertial observations in UAV applications. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 2017. č. 130, str. 1-12. ISSN 09242716.

GLENNIE, C. (2007): Rigorous 3D error analysis of kinematic scanning LIDAR systems. *Journal of Applied Geodesy*, roč. 1, č. 3, str. 147.

GRESSIN, A., MALLET, C., DAVID, N. (2012): Improving 3D LiDAR point cloud registration using optimal neighborhood knowledge. *ISPRS*. 2012. roč. I-3, str. 111–116.

HABIB, A. F., a kol. (2008): LiDAR strip adjustment using conjugate linear features in overlapping strips. *Proceedings of International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2008. str. 385-390.

REHAK, M., SKALOUD, J. (2017): Performance assessment of integrated sensor orientation with a low-cost GNSS receiver. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. 2017. roč. IV-2, č. W3, str. 75-80. ISSN 21949042.

SKALOUD, J., LICHTI, D. (2006): Rigorous approach to bore-sight self-calibration in airborne laser scanning. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 2006. roč. 61, č. 1, str. 47-59. ISSN 09242716.

SKALOUD, J., LEGAT, K. (2008): Theory and reality of direct georeferencing in national coordinates. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 2008. roč. 63, č. 2, str. 272-282. ISSN 09242716.

SKALOUD, J., a kol. (2010): Real-time registration of airborne laser data with sub-decimeter accuracy. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, roč. 65, č. 2, str. 208-217.

SKALOUD, J., REHAK, M., LICHTI, D. (2014): Mapping with MAV: Experimental Study on the Contribution of Absolute and Relative Aerial Position Control. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. 2014. roč. XL-3, č. W1, str. 123-129. ISSN 16821750.

Vedoucí diplomové práce: Ing. Markéta Potůčková, Ph.D.

Datum zadání diplomové práce: 16. 01. 2019

Termín odevzdání diplomové práce: 11. 12. 2020

Platnost tohoto zadání je po dobu jednoho akademického roku.

.....

vedoucí diplomové práce

.....

vedoucí katedry

V Praze dne 10. 12. 2020

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci zpracoval samostatně pod vedením Ing. Markéty Potůčkové, Ph.D., a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje a literaturu. Tato práce ani její podstatná část nebyla předložena k získání jiného nebo stejného akademického titulu.

V Praze dne 10. 12. 2020

.....

Dennis Dvořák

Rád bych tímto poděkoval vedoucí diplomové práce Ing. Markétě Potůčkové, Ph.D., za její odborné vedení, cenné rady a připomínky během zpracovávání celé práce. Moje poděkování patří také kolegům Ing. Davidu Hofmanovi, Ing. Martinu Jáklovi, Ing. Janu Štíchovi a Štěpánu Bečvářovi, kteří kontrolovali mé výpočty a konzultovali se mnou dosažené výsledky dílčích výzkumů.

CITACE

DVOŘÁK, D. (2020): Kalibrace UAV laserového skenování. Univerzita Karlova. Přírodovědecká fakulta. 2020.

DVORAK, D. (2020): Calibration parameters of the UAV laser scanning. Charles University in Prague. Faculty of Science. 2020.

Abstrakt

Prostorová přesnost bodů získaných z leteckého laserového skenování je nejvíce ovlivněna parametry použitého GNSS přijímače, IMU jednotky a parametry vlastního letu. Důležitou roli hraje přesnost tzv. kalibrace, tj. určení prvků transformace mezi souřadnicovými systémy vlastní skenovací jednotky, IMU a pozicí fázového centra GNSS antény. Diplomová práce se zabývá přesností kalibrace IMU/GNSS jednotky. Porovnává posuny a rotace bodového mračka pořízeného LiDARem (laserový skener RIEGL miniVUX-1UAV) ve vztahu ke kalibračním prvkům daným výrobcem. Výsledky hodnotí pomocí vypočítaných směrodatných odchylek a polohových diferencí v surovém bodovém mračku, případně porovnáním bodových mraček získaných jinou metodou. Dále se zaměřuje na ověření geometrické přesnosti pomocí kontrolních bodů. Přesnost kalibrace IMU/GNSS je, po ověření výsledků a porovnání vlivu kalibračních prvků daných výrobcem, minimální. Nebylo zjištěno výrazné zlepšení kvality bodového mračka. Současně bylo zjištěno, že pro lepší kvalitu naskenovaných dat, je potřeba provést při skenování UAV křížové lety.

Klíčová slova

UAV, RPAS, laserové skenování, bodové mračko, kalibrace

Abstract

The spatial accuracy of points obtained from aerial laser scanning is most affected by the parameters of the GNSS receiver used, the IMU unit and the parameters of the flight itself. An important role is played by the accuracy of the so-called calibration, ie the determination of the transformation elements between the coordinate systems of the scanning unit itself, the IMU and the position of the phase center of the GNSS antenna. The diploma thesis deals with the calibration accuracy of the IMU / GNSS unit. It compares the displacements and rotations of a point cloud acquired by LiDAR (laser scanner RIEGL miniVUX-1UAV) in relation to the calibration elements given by the manufacturer. Evaluate the results using calculated standard deviations and positional differences in the raw point cloud, or by comparing point clouds obtained by another method. It also focuses on verifying geometric accuracy using checkpoints. The accuracy of the IMU / GNSS calibration is minimal after verifying the results and comparing the influence of the calibration elements given by the manufacturer. There was no significant improvement in the quality of the point cloud. At the same time, it was found that for better quality of the scanned data, it is necessary to perform cross-flights when UAV scanning.

Key words

UAV, RPAS, laser scanning, point cloud, calibration

Obsah

Seznam obrázků	11
Seznam tabulek	14
Seznam použitých zkratk	15
1. Úvod a cíle práce	17
2. Obecný úvod do problematiky	20
2.1 Laserové skenování	20
2.1.1 Laserové dálkoměry	20
2.1.2 Rozmítání laserového paprsku	22
2.1.3 Přesnost skenovacího systému	23
2.2 Charakteristika UAV	24
2.2.1 IMU/GNSS	25
2.2.2 Plán letu	27
2.3 Zpracování měření UAV	29
2.3.1 Bodové mračno	29
2.3.2 Kalibrační jednotky	31
2.3.3 Kalibrace senzoru	32
2.3.4 Výpočet parametrů kalibrace	34
2.3.5 Ověření přesnosti kontrolními body	37
3. Zájmové území a použitá data	40
3.1 Zájmové území	40
3.2 Použitá data UAV	41
3.3 Použitá data pro validaci	44
4. Metodika	45
4.1 Výběr metodiky	45
4.2 Zpracování dat	48
4.2.1 Předzpracování	48
4.2.2 Zpracování dat UAV	49
4.2.3 Zpracování dat pro validaci	49
5. Výsledky	51
5.1 Parametry hledání společných ploch slícování pásů	51
5.2 Dva na sebe kolmé pásy (Kom. 1)	52
5.3 Příčné pásy (Kom. 2)	54

5.4	Všechny pásy	56
5.5	Validace výsledků	58
5.5.1	Fotogrammetrie.....	58
5.5.2	Scan z totální stanice.....	60
5.5.3	Řez plochou	62
5.5.4	Rezidua na kontrolních bodech.....	62
6.	Diskuze.....	66
7.	Závěr	71
	Použitá literatura a zdroje práce.....	73
	Přílohy práce	78
	Použitý software	83
	Použité přístroje	84

Seznam obrázků

Obrázek 2.1: Vlevo – schéma impulsního dálkoměru (Jašek 2018 cit. Rueger 1990); vpravo nahoře – AT je vyslaný signál; vpravo dole – AR je dopočetní času mezi impulzy (Wehl a kol. 1999)	21
Obrázek 2.2: Vlevo – schéma fázového dálkoměru (Jašek 2018 cit. Rueger 1990); vpravo nahoře – AT je vyslaný signál; vpravo dole – AR je dopočetní fáze vlny ($\Phi_R - \Phi_T$) (Wehl a kol. 1999)	22
Obrázek 2.3: Skenovací mechanismy (Wehl a kol. 1999)	22
Obrázek 2.4: Prostorová polární metoda (Jašek 2018; s. 16)	23
Obrázek 2.5: Klíčové součásti laserového skeneru UAV (přeloženo: Wehr a kol. 1999)	25
Obrázek 2.6: Schéma umístění měřicích přístrojů: laserový skener (CAM), IMU jednotka a DGPS (ANT) (Rehak a kol. 2015, s. 26)	25
Obrázek 2.7: Proces IMU, GNSS a skeneru v kontrolní, monitorovací a záznamové jednotce (Cucci a kol. 2017, s. 2)	26
Obrázek 2.8: Plán letu (Moudry a kol. 2019)	28
Obrázek 2.9: Plán letu a umístění vřícovacích bodů (přeloženo: Cucci a kol. 2017, s. 8)	28
Obrázek 2.10: Vřícovací bod – vlevo – použití terče měření Nechranická přehrada; vpravo – koule pro účely skenování – lokalita Horní Vidim	29
Obrázek 2.11: Posuny x, y, z a rotace ω, ϕ, κ (Tu a kol. 2018)	31
Obrázek 2.12: Porovnání vhodnosti využití stadionu a zastavěné plochy pro potřeby kalibrace (Skaloud a kol. 2006, s. 52)	32
Obrázek 2.13: Přelety různými směry (trajektorie UAV) (přeloženo: Cucci a kol. 2017, s. 8)	33
Obrázek 2.14: Schéma kalibrace při použití zaměřených bodů a antény UAV (přeloženo: Rehak a kol. 2015, s. 26)	33
Obrázek 2.15: Bodové mračno rozdělené na jednotlivé pásy (vlevo Habib a kol. 2008; vpravo Wang a kol. 2010)	34

Obrázek 2.16: 3D Box, vymezení dle parametrů (Akca a kol. 2006, s. 189)	37
Obrázek 2.17: Příčný řez – před kalibrací a po kalibraci senzoru – praktický přístup (vlevo – Wang a kol. 2010; vpravo – Habib a kol. 2008)	37
Obrázek 2.18: Výškové rezidua dvou vybraných naskenovaných mračen (Urban a kol. 2018, s. 334)	38
Obrázek 2.19: Příčný profil a rozdíly tří naskenovaných mračen (Koska a kol. 2017)	39
Obrázek 3.1: Experimentální oblast Horní Vidim – ortofoto (Mapy.cz)	40
Obrázek 3.2: Trafostanice	41
Obrázek 3.3: Trajektorie letu UAV a zobrazení naskenované oblasti (vlevo – tři vybrané pásy; vpravo – všechny naskenované pásy)	42
Obrázek 3.4: Naskenované pásy (nahore – 191015_123252; uprostřed – 191015_123410; dole – 191015_123531)	43
Obrázek 3.5: Foto experimentální oblasti. Vlčovací body. nahore – zaměřený patník; vlevo dole – terč; vpravo dole – koule	44
Obrázek 3.6: Koláž vybraných fotek pro fotogrammetrii	44
Obrázek 4.1: Metody kalibrace IMU/GNSS, vybrané metody – vlevo (Habib a kol. 2008); uprostřed (Wang a kol. 2010); vpravo (Cucci a kol. 2017, s. 8)	45
Obrázek 4.2: Proces zpracování leteckých laserových dat (přeloženo: Wehl a kol. 1999, s. 79)	48
Obrázek 4.3: Vlevo – model z fotogrammetrie (sw CloudCompare); vpravo – bodové mračno z multistanice (sw Infinity)	50
Obrázek 5.1: Kolmé pásy – žádné kalibrační jednotky	53
Obrázek 5.2: Kolmé pásy – rotace a posun pásů	53
Obrázek 5.3: Kolmé pásy – kalibrace IMU jednotky a rotace a posun pásů	53
Obrázek 5.4: Příčné pásy – žádné kalibrační jednotky	55
Obrázek 5.5: Příčné pásy – rotace a posun pásů	56
Obrázek 5.6: Příčné pásy – kalibrace IMU jednotky, rotace a posun pásů	56
Obrázek 5.7: Umístění objektu v bodovém mračnu	58

Obrázek 5.8: Rezidua na trafostanici – nekalibrované UAV a fotogrammetrie	58
Obrázek 5.9: Rezidua na trafostanici – kalibrační jednotka – jen rotace a fotogrammetrie	59
Obrázek 5.10: Rezidua na trafostanici – kalibrační jednotka – jen posun a fotogrammetrie ...	59
Obrázek 5.11: Rezidua na trafostanici – kalib. jednotka laseru + posun + rotace a fotogrammetrie.....	60
Obrázek 5.12: Rezidua na trafostanici – kalib. jednotka laseru + posun + rotace (pro kolmé pásy) a multistanice	61
Obrázek 5.13: Rezidua na trafostanici – kalib. jednotka laseru + posun + rotace (pro příčné pásy) a multistanice	61
Obrázek 5.14: příčný řez – vlevo – před kalibrací; vpravo – po kalibraci IMU/GNSS (posun a rotace)	62
Obrázek 5.15: vlevo – použité kontrolní body v bodovém mračnu, vpravo - 3DReshaper a umístění všech měřených bodů v bodovém mračnu	63

Seznam tabulek

Tabulka 5.1: Parametry pro hledání slícovacích ploch.....	51
Tabulka 5.2: Kolmé pásy – kalibrace	52
Tabulka 5.3: Kolmé pásy – kalibrace – redukce pásů	52
Tabulka 5.4: Kolmé pásy – kalibrace IMU.....	52
Tabulka 5.5: Příčné pásy – kalibrace	54
Tabulka 5.6: Příčné pásy – kalibrace – redukce pásů	55
Tabulka 5.7: Příčné pásy – kalibrace IMU	55
Tabulka 5.8: Všechny pásy – kalibrace	57
Tabulka 5.9: Odchyly vzdáleností nezpracovaného bodového mračka a GNSS měření.....	63
Tabulka 5.10: Odchyly vzdáleností nekalibrovaných kolmých naskenovaných pásů a GNSS měření	64
Tabulka 5.11: Odchyly vzdáleností kalibrovaných kolmých naskenovaných pásů a GNSS měření	64
Tabulka 5.12: Odchyly vzdáleností nekalibrovaných příčných naskenovaných pásů a GNSS měření	64
Tabulka 5.13 : Odchyly vzdáleností kalibrovaných příčných naskenovaných pásů a GNSS měření.	65

Seznam použitých zkratk

ALS	<i>(Airborne Laser Scanning)</i> letecké laserové skenování
BDS	<i>(BeiDou System)</i> čínský globální družicový polohový systém
BIM	<i>(Building Information Modeling/Management)</i> informační model budovy
CAD	<i>(Computed-Aided Design/Drafting)</i> počítačem podporované projektování/kreslení
CCD	<i>(Charge-Coupled Device)</i> zařízení s vázanými náboji (součást dálkoměrů)
ČÚZK	Český úřad zeměměřický a katastrální
DGPS	<i>(Differential Global Positioning System)</i> diferenciální globální polohový systém
DMT	Digitální model terénu
ETRS89	<i>(European Terrestrial Reference System 1989)</i> evropský terestrický polohový systém
GIS	Geografické informační systémy
GLONASS	<i>(GLObalnaja NAVigacionnaja Sputnikovaja Sistéma)</i> ruský globální družicový polohový systém
GNSS	<i>(Global Navigation Satellite System)</i> globální družicový polohový systém
GPS	<i>(Global Positioning System)</i> americký globální družicový polohový systém
IMU	<i>(Inertial Measurement Unit)</i> inerciální měřicí jednotka
KF	Kalmanův filtr
LiDAR	<i>(Light Detenction And Ranging)</i> detekce objektů a vzdáleností světlem
MAV	<i>(Micro Aerial Vehicle)</i> malé bezpilotní letadlo (<i>syn. RPAS, UAS, UAV</i>)
MNČ	metoda nejmenších čtverců

POS	<i>(Position and Orientation System)</i> systém pro pozici a orientaci
RC	<i>(Radio Control)</i> rádiové ovládání
RPAS	<i>(Remotely Piloted Aircraft Systems)</i> dálkově pilotované letadlové systémy (syn. <i>MAV, UAS, UAV</i>)
RTK	<i>(Real-Time Kinematic)</i> kinematický v reálném čase
S-JTSK	Systém jednotné trigonometrické sítě katastrální
TIN	<i>(Triangulated Irregular Network)</i> nepravidelná trojúhelníková síť
UAS	<i>(Unmanned Aircraft Systems)</i> bezpilotní letadlo (syn. <i>MAV, RPAS, UAV</i>)
UAV	<i>(Unmanned Aerial Vehicle)</i> bezpilotní letadlo (syn. <i>MAV, RPAS, UAS</i>)
WGS84	<i>(World Geodetic System 1984)</i> geodetický polohový referenční systém

1. Úvod a cíle práce

V posledních letech došlo k významnému vývoji laserového skenování. Laserové skenování je technologie, která umožňuje získat prostorová data. Jeho předností je rychlost sběru dat a jeho velká využitelnost napříč obory. Jeho aplikace najdeme ve 3D modelování stavebních objektů (například BIM), v dokumentaci provedení skutečných stavů, například staveb, v zaměřovacích pracích pro archeology, pro potřeby využití GIS, přírodovědné obory, geotechnický monitoring, potřebu těžebního průmyslu nebo pro potřebu digitalizace katastru nemovitostí atd. Laserové skenování můžeme rozdělit do několika druhů: pozemní (terestrické či statické), letecké, mobilní a ruční. S příchodem kvadrokoptér, dronů a RC modelů, je dnes letecké laserové skenování jednou z nejprogresivnější se rozvíjejících metod sběru dat. Nejvíce se o to zasloužil rozvoj a především finanční dostupnost bezpilotních přístrojů (UAV), na kterých se laserový skener nachází, společně s rozvojem technologií a metod zpracování dat globálních navigačních družicových systémů (GNSS) a inerciálních navigačních/měřících systémů/jednotek (INS/IMU).

Jedním z problémů zpracování laserového skenování UAV je kalibrace senzoru. Kalibrační systém senzoru je jednou z nejdůležitějších částí pro zajištění správného výkonu UAV. Správná kalibrace snímače umožňuje přesné měření polohy, výšky a rychlosti letadla. Kalibraci je možné provést na různých částech UAV, které jsou součástí přístroje. Mezi ně patří akcelerometr, gyroskop a GNSS senzor (součásti IMU/GNSS jednotky), magnetometr nebo senzor statického a dynamického tlaku. Tato práce se zabývá kalibrací senzoru IMU/GNSS. Kalibrací se stanoví chyba kalibračních jednotek (viz níže).

Kalibrace senzoru IMU/GNSS UAV má zásadní vliv na přesnost výsledného bodového mráčka. Z důvodu chybné kalibrace při skenování dochází k systematickému posunu bodových mráčen, která jsou naskenována v jednotlivých částech letu. Obdobně při terestrickém skenování je možné sledovat určitý posun a případně jinou orientaci skenovaných objektů pořízených z jednotlivých stanovisek. Je to dáno jednak vnějšími vlivy, jako je například šum naskenovaných dat nebo odrazivost skenovaného materiálu, jednak vlivy vnitřními. Mezi vnitřní vlivy můžeme zařadit již výše zmíněné systematické chyby IMU/GNSS, magnetometru nebo senzoru statického a dynamického tlaku. Autoři Rehak (2017) nebo Stocker (2017) uvádějí, že konečná polohová přesnost je ovlivněna především

kvalitou palubních senzorů, zjištěním jejich kalibrací a následnou úpravou kalibračních jednotek a jejich začlenění do výpočtu pro zpřesnění polohové přesnosti. Taktéž uvádějí, že nejvyšší vliv na výslednou přesnost má kalibrace IMU jednotky.

Na rozdíl od terestrického měření, kdy jsou známy polohy jednotlivých stanovisek, a tudíž je možné si bodové mračno rozdělit na jednotlivá stanoviska a poté si jednotlivá bodová mračna slícovat, je měření UAV koncipováno jinak. Jednotliví autoři (například Wehr 1999a; Rehak 2017) se shodují, že obdobou stanoviska při terestrickém měření je u letu UAV (nebo také ALS) jeden neměnný směr (orientace) letu. Při kalibraci senzoru UAV vycházejí proto všichni autoři z tohoto předpokladu.

Kalibrace IMU/GNSS jednotky/senzoru tedy vychází z předpokladu, že naskenované bodové mračno je v jednotlivých částech letu systematicky posunuto nebo má jinou orientaci. To znamená, že jednotlivá bodová mračna, která byla získána během letu v různých směrech, nejsou slícovaná a obsahují systematickou chybu měření IMU/GNSS jednotky.

Pokud bychom chtěli jednotlivá bodová mračna slícovat, je možné použít dvě metody. První metodou je vynechat vliv IMU/GNSS jednotky a provést automatizovaný postup relativního slícování naskenovaných jednotlivých mračen. Druhou možností je kalibrovat senzor IMU/GNSS, tzn. že se let UAV rozdělí na jednotlivé naskenované pásy a kalibrací se dopočítají kalibrační jednotky - posun, rotace a měřítko. Nicméně autoři, jako jsou Habib (2008), Wang (2010) nebo Rehak (2015), kteří se problematikou kalibrace senzoru UAV zabývají, se shodují na tom, že prozatím neexistuje žádný standardní postup. Každá firma či instituce má vlastní postup.

Z technické podstaty problematiky kalibrace senzoru UAV je vhodné zmínit, že zásadní otázkou je vliv posunu a rotace mezi senzory IMU a GNSS anténou. Přístup k vlivu těchto dvou parametrů je analytický. Je tedy na kalibraci IMU/GNSS jednotky více zásadní vliv posunu (x, y, z), nebo rotace (ω, ϕ, κ)? Pokud je možné dokázat větší vliv jednoho z těchto parametrů, je taktéž možné posoudit jednotlivé metody výpočtu těchto parametrů. Tím, že některé metody výpočtu kalibrace senzoru více ovlivňují například posun, je možné při větším vlivu posunu zvážit, zda je tato metoda vhodnější pro výpočet kalibrace, a tím pádem pro přesnější slícování výsledného bodového mračna.

Hlavním cílem práce je nalezení vlivu jednotlivých parametrů kalibrace IMU a GNSS senzoru a jejich statistické zhodnocení. Součástí posouzení vlivu je kontrola metodiky pro

výpočet těchto parametrů. Zkoumanými parametry jsou kalibrační jednotky - posun (x, y, z) a rotace (ω, φ, κ). Parametry jsou získány z výpočtu slícování vybraných ploch pomocí metody MNČ. Součástí práce je posouzení vlivu skenování příčných a podélných pásů (Stocker (2017), s. 355 příčné a podélné pásy označuje jako křížové lety) na výslednou přesnost bodového mračka.

Jelikož se jedná spíše o technický problém, jsou v úvodní kapitole zmíněny především komponenty, které se nacházejí na UAV. Je zde uvedena obecná terminologie týkající se laserového skenování. Součástí je také popis měření UAV a samotný teoretický základ pro výpočet kalibrace IMU/GNSS senzoru. Práce vychází z literární rešerše, která se kalibrací zabývá.

Pro výzkum byl použit laserový skener RIEGL miniVUX-1 UAV a jako modelové území bylo vybráno území v obci Horní Vidim v okrese Mělník, které splňovalo parametry vhodné pro výpočet kalibrace senzoru. Součástí práce je také ověření výsledku slícování dat. Proto je použito měření z totální stanice a fotogrammetrie. Následně jsou porovnávána jednotlivá bodová mračka na vybraném objektu. V metodické části je popsán postup a vlastní zpracování jednotlivých metod měření. V dalších kapitolách jsou uvedeny výsledky výpočtů, včetně jejich vizualizace. Součástí je také validace výsledků. Následně jsou výsledky zhodnoceny a diskutovány.

2. Obecný úvod do problematiky

V úvodu této kapitoly je shrnuta základní terminologie a teoretické základy laserového skenování. **Modelování** je proces vytvoření 3D modelu z bodového mračna. Jako **mračno bodů** rozumíme soubor měření z laserového skenování, jež reprezentuje body ve 3D; body na objektech nereprezentují hrany nebo uzly. **Obrazové skenování** označuje postup, při kterém se mračno bodů získá metodou fotogrammetrie. **Parametry skenování** jsou parametry, jež si uživatel nastaví před skenováním; jedná se například o maximální úhel snímání, hustotu skenování, nastavení intenzity. **Plán letu** je primárně nastavení trajektorie letu; kontroluje se vzdálenost mezi expozicemi snímku či překryt bodových mračen u laserového skenování. **Registrací** je myšlena jako proces transformace naskenovaných dat do určitého souřadnicového systému (např. S-JTSK, ETRS89, WGS84). **Rozlišovací schopnost** charakterizuje nejmenší detail, který lze z bodového mračna rozlišit. **Sken** je bodové mračno změřené z jednoho stanoviska při jednotném nastavení parametrů. Obdobou skenu je naskenovaný **pás**. Pás reprezentuje bodové mračno, jež bylo naskenováno během letu v jednom neměnném směru. **Šumem** rozumíme chybně změřené body, které jsou následně mimo množinu skenovaného objektu / území. **Kalibrace** je soubor úkonů, při kterých se zjišťují charakteristiky přístroje. Po kalibraci může být provedena justáž přístroje. (dle Wehr a kol. 1999; Pavelka 2009 nebo Jašek 2018 cit. Štroner a kol. 2013).

2.1 Laserové skenování

2.1.1 Laserové dálkoměry

Přístroj využívající laser pro měření vzdálenosti se označuje jako LiDAR. Tyto, ve své podstatě dálkoměry jsou založeny na principu elektronického určení délky, využívají vyslání elektromagnetického vlnění a odrazení paprsku do zdrojového centra. Používají se nejčastěji dva principy měření a určování délek: pulzní určování délky a fázové určování délky (Rueger 1990; Wehr a kol. 1999).

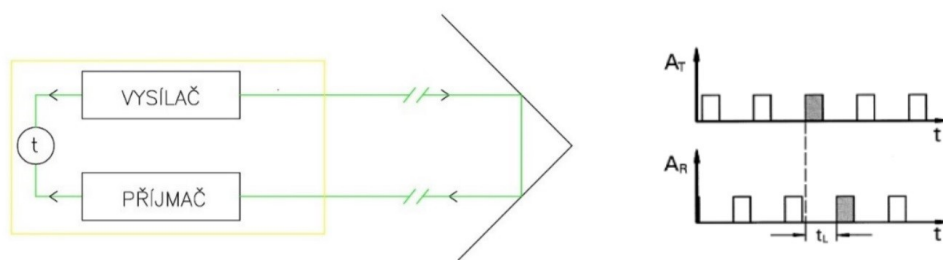
V současné době je nejpoužívanějším způsobem ve skenovacích systémech impulsní určování délky. Princip impulsního určování délky je založen na měření tranzitního času. Vysílač LiDARu vyšle impuls a v té chvíli začne výpočet tranzitního času, trvá až do

zpětného přijetí paprsku. Problém nastává při vypočítání tranzitního času. Pokud je přesnost odečtu času 0,1 ns, je přesnost určení délky 15 mm. Tranzitní čas odečítají metody časoměrné základy nebo časoměrné impulsy. Výhodou tohoto určování délky je velký dosah dálkoměru (Baltsavias 1999b; Wehr a kol. 1999; Jašek 2018 cit. Rueger 1990). Základní rovnice pro výpočet impulsního určení délky je (Wehr a kol. 1999 a Jašek 2018 cit. Rueger 1990):

$$R = \frac{1}{2}c(t_R - t_T) \quad (2.1)$$

Kde:

- R je měřená vzdálenost;
- c je rychlost světla v prostředí měření;
- t_R je čas přijetí impulsu;
- t_T je čas vyslání impulsu.



Obrázek 2.1: Vlevo – schéma impulsního dálkoměru (Jašek 2018 cit. Rueger 1990); vpravo nahoře – A_T je vyslaný signál; vpravo dole – A_R je dopočtení času mezi impulzy (Wehl a kol. 1999)

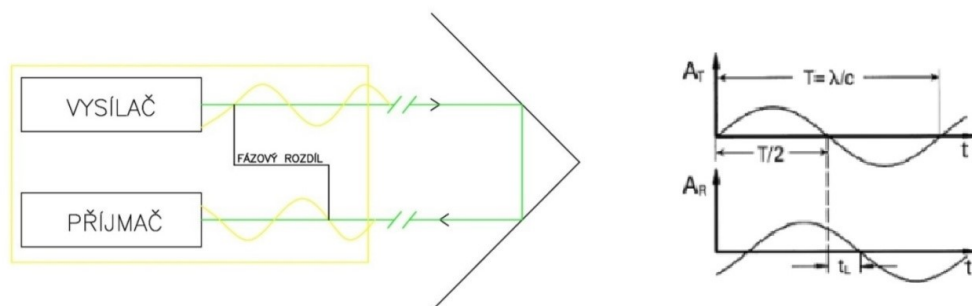
Fázový dálkoměr měří fázový rozdíl u vyslaného signálu. Přístroj vyšle fázovou vlnu a zpět se vrátí vlna v jiné fázi. Jelikož jsou známy parametry modulované vlny, přístroj si z tohoto rozdílu dopočte měřenou vzdálenost. Přístroje používají více různých délek vyslaných vln, aby byla přesnost fázového doměrku co největší. Stejně jako u impulsního určování délek je rychlost paprsku dána indexem lomu prostředí. Tento index nejvíce ovlivňují teplota, tlak a vlhkost. Ve většině moderních přístrojů s dálkoměrem si může uživatel tyto hodnoty nastavit. Fázové určení délek využívají přístroje, které slouží k velmi přesné práci. Nevýhodou fázového dálkoměru je, že jím nelze měřit krátké vzdálenosti (Baltsavias 1999b; Wehl a kol. 1999; Jašek 2018).

Základní rovnice pro výpočet fázového určení délky je (Wehr a kol. 1999):

$$R = \frac{1}{4\pi} \frac{c}{f} \Phi \quad (2.2)$$

Kde:

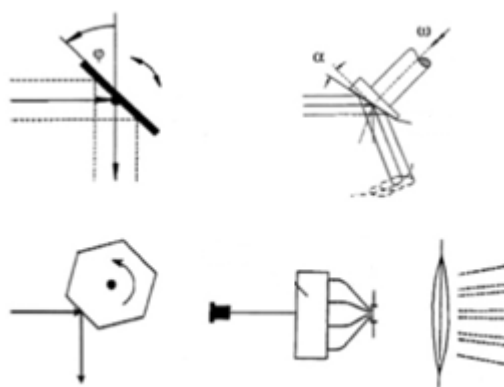
- R je měřená vzdálenost;
- c je rychlost světla v prostředí měření;
- f je vlnová délka;
- Φ je měřená fáze vlny (fázový rozdíl v radiánech).



Obrázek 2.2: Vlevo – schéma fázového dálkoměru (Jašek 2018 cit. Rueger 1990); vpravo nahoře – A_T je vyslaný signál; vpravo dole – A_R je dopočetí fáze vlny ($\Phi_R - \Phi_T$) (Wehl a kol. 1999)

2.1.2 Rozmítání laserového paprsku

Pro laserový skener je charakteristické, že dokáže změřit několik tisíc bodů za minutu. Konstrukčně je toto řešeno zařízením k rozmítání svazku. Výrobci laserových skenerů používají několik konstrukčních možností (Wehl a kol. 1999).



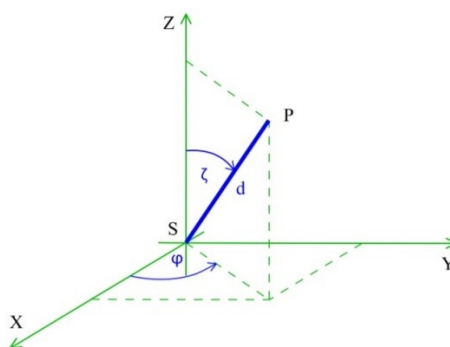
Obrázek 2.3: Skenovací mechanismy (Wehl a kol. 1999)

Nejjednodušším řešením rozmítání svazku paprsku je rozmítání pomocí zrcadla. Takto vznikne svazek laseru v jedné rovině. Pokud by bylo použito více zrcátek, nastalo by

vychýlení ve více směrech. Další možností je rozmítání pomocí optického elementu, který má tvar n-úhelníku. Tento optický element odráží paprsky pomocí své rotace (Wehl a kol. 1999; Štroner a kol. 2008). Rozmítání svazku paprsků lze dosáhnout také pomocí rotace zdroje záření. Používá se zde systém motorů, které jsou umístěny vertikálně a horizontálně. Tímto se svazek paprsků vychyluje ve dvou osách (Štroner a kol. 2008; Jašek 2018). Pomocí CCD senzoru můžeme rozmítat svazek ve výseči světelné roviny (Štroner a kol. 2008; Jašek 2018). Poslední metodou rozmítání v laserových skenerech, které jsou určeny pro UAV, je metoda optických vláken. Laserový paprsek je promítán do optických vláken, která jsou uspořádána do kružnice. Následně se optické dráty rovnají do roviny. Motor přitom stále rotuje optickými vlákny, čímž vznikají oscilující rozptýlené svazky (Wehl a kol. 1999; Štroner a kol. 2008).

2.1.3 Přesnost skenovacího systému

Nedílnou součástí rozboru skenovacího systému je určení přesnosti laserového skeneru. Vlivů na přesnost změřeného bodového mračka může být vícero. Tyto vlivy například Jašek (2018), Štroner (2008) i Eker (2017) dělí na vnitřní a vnější. Mezi hlavní vnitřní vlivy patří přesnost určení vodorovného a zenitového úhlu. K dalším parametrům, které zasahují do výsledné přesnosti, jsou tzv. vlivy systematické, jež nelze odstranit, jelikož jsou součástí každého přístroje. Lze je eliminovat například vhodnou kalibrací (Pirasteh a kol. 2016). Vlivy chyb měření úhlů a délek však můžeme vyjádřit chybovým modelem, respektive rozбором určení polohy bodů (Jašek 2018). Jašek (2018) nebo Novák (1998) odvozují rovnici polohové přesnosti měřeného bodu z prostorové polární metody.



Obrázek 2.4: Prostorová polární metoda (Jašek 2018; s. 16)

Rovnice výpočtu souřadnic (dle Jaška 2018; kontrola výpočtu Novák a kol. 1998):

$$x = d \cdot \cos(\omega) \cdot \sin(\zeta)$$

$$y = d \cdot \sin(\omega) \cdot \sin(\zeta)$$

$$z = d \cdot \sin(\zeta) \quad (2.3)$$

Kde: d je měřená délka;
 ω je měřený vodorovný úhel;
 ζ je měřený zenitový úhel.

Odvození dále pokračuje vztahem skutečných chyb, které definují souřadnicovou soustavu danou laserovým skenerem. Poté jsou podle zákona hromadění směrodatných odchylek vypočteny odchylky souřadnic určovaného bodu (viz výpočty Jašek 2018, s. 25–26). Výsledná rovnice zní:

$$\sigma_P = \sqrt{\sigma_d^2 + d^2 \cdot \sin^2 \zeta \cdot \sigma_\omega^2 + d^2 \cdot \sigma_\zeta^2} \quad (2.4)$$

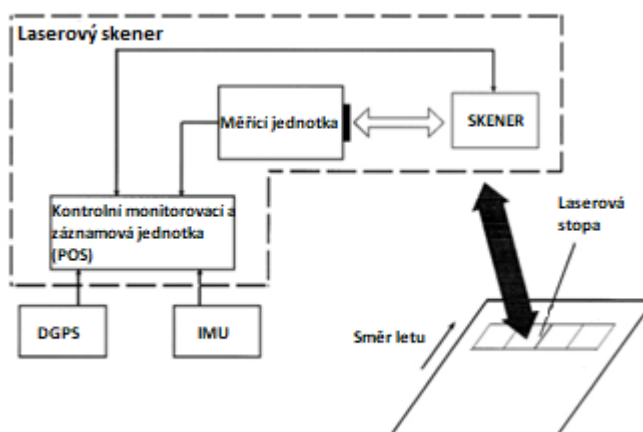
Kde: σ_P je směrodatná odchylka měřeného bodu;
 σ_d je směrodatná odchylka měřené délky;
 σ_ω je směrodatná odchylka vodorovného úhlu;
 σ_ζ je směrodatná odchylka zenitového úhlu.

Tato rovnice ovšem odpovídá přesnosti měření terestrického laserového skeneru. Přesto pro velmi přesné práce a přidání veškerých vlivů měření UAV by bylo vhodné tento parametr zohlednit (Gressin a kol. 2012). Jak je uvedeno výše, dalšími parametry, které ovlivňují průběh paprsku laserového skeneru, jsou vnější vlivy. Výrazným vlivem je prostředí, kterým prochází svazek. Důvodem jsou změny indexu lomu, kterým prochází elektromagnetické záření. Paprsky poté nejsou přímkami, ale prostorovými křivkami (Wehl a kol. 1999; Baltsavias 1999b). Mezi další vnější vlivy patří například vliv geometrie skenovaných objektů (Jašek 2018).

2.2 Charakteristika UAV

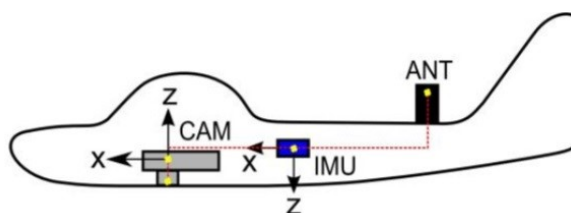
Laserové skenery využívají opticko-mechanické skenovací sestavy. Pracují na principu zjištění vzdálenosti mezi senzorem a osvětleným místem na Zemi. K těmto skenerům můžeme zařadit skenery nesené pilotovaným letadlem a skenery připojené na UAV platformu

(Wehr a kol. 1999, s. 68; Baltsavias 1999b). Všechny tyto letecké platformy laserových skenerů obsahují tyto klíčové součásti: laserovou měřicí jednotku, opticko-mechanický skener a řídicí jednotku (viz obr. 2.5) (Wehr a kol. 1999, Gressin a kol. 2012).



Obrázek 2.5: Klíčové součásti laserového skeneru UAV (přeloženo: Wehr a kol. 1999)

Základem uvedeného mechanismu je kontrolní monitorovací a záznamová jednotka (POS). Tato jednotka zpracovává údaje ze tří přístrojů; jedná se o měřicí jednotku (laserový skener), DGPS (diferenciální GPS) a IMU jednotku (viz obr. 2.5) (Rehak a kol. 2015). Spojení komunikace jednotky DGPS a jednotky IMU pomocí POS se v odborné literatuře (Skaloud a kol. 2008; Rehak a kol. 2015 nebo Clausen a kol. 2016) označuje jako IMU/GNSS. Klíčové součásti, tj. POS a IMU/GNSS jednotka, se nacházejí jak v UAV, tak v ALS.

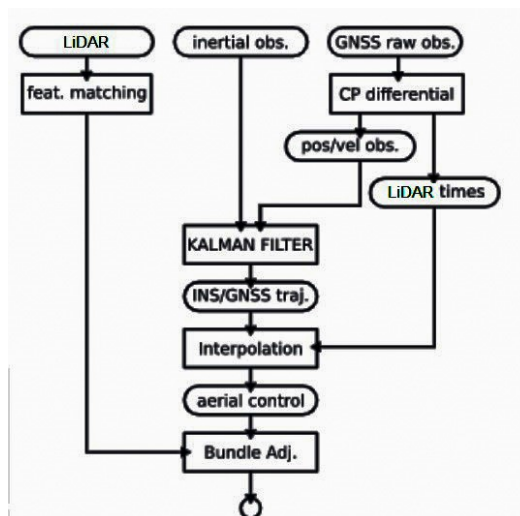


Obrázek 2.6: Schéma umístění měřicích přístrojů: laserový skener (CAM), IMU jednotka a DGPS (ANT) (Rehak a kol. 2015, s. 26)

2.2.1 IMU/GNSS

Základním předpokladem pro správnou součinnost skeneru, IMU a GNSS antény leteckého laserového skenování je správná funkce kontrolní, monitorovací a záznamové jednotky. Zatímco laserový skener měří vzdálenost a úhly, je potřeba kvůli pohybu UAV znát

3D polohu skeneru a následně vypočítat 3D polohu bodů na zemském povrchu. Proces automatizace tohoto procesu je uveden na obr. 2.7 (Wahl a kol. 1999; Cucci a kol. 2017).



Obrázek 2.7: Proces IMU, GNSS a skeneru v kontrolní, monitorovací a záznamové jednotce (Cucci a kol. 2017, s. 2)

GNSS senzor slouží k lokalizaci přístroje. Systém primárně pracuje v globálním souřadnicovém systému (WGS84). GNSS může využívat v současné době čtyři systémy: GPS, GLONASS, BDS a Galileo. Skládá se z kosmického segmentu (družice), řídicího segmentu (monitoring družic a zpracování pomocných dat) a uživatelského segmentu (přijímač GNSS). UAV využívá speciální oddělenou anténu pro GNSS měření (obr. 2.6). Anténa je kruhově polarizována a musí být schopna přijmout signál ze všech směrů hemisféry. GNSS pracují na principu dálkoměrných systémů. Pro výpočet polohy je třeba znát vzdálenost přijímače od družice (protínání z délek). Pro zpřesnění se používá metoda RTK nebo následné zpracování (postprocessing). V České republice provozuje síť stanic pro korekce GNSS (tzv. CZEPOS) ČÚZK (Štroner a kol. 2013; Trafina 2018).

IMU jednotka využívá akcelerometry a gyroskopy, které měří odpovídajícím způsobem lineární a úhlové zrychlení. Jiné fyzikální veličiny (rychlost lineární/úhlová a poloha) jsou nejčastěji určovány integrací v procesu spojení IMU a GNSS. IMU jednotka je schopna získat počáteční směr pohybu měřením ve směru gravitačního tahu (zrychlení). IMU jednotky se navíc vybavují magnetometry, které zpřesňují polohu jednotky, a čidlem okolního tlaku, které zlepšuje měření nadmořské výšky. Lépe vybavené IMU jednotky také obsahují vlastní GNSS senzor (bez integrace do výpočtu kontrolní, monitorovací a záznamové jednotky) pro lepší výpočet trajektorie (Cucci a kol. 2017; Trafina 2018; Yang 2018).

O data z laserového skeneru, IMU a GNSS jednotky se stará kontrolní, monitorovací a záznamová jednotka. Zatímco data ze skeneru jsou připojena jako neměnná jednotka (použijí se pouze souřadnice spočtené z polární metody), GNSS přijímač registruje v určitém časovém odstupu polohu přístroje (formát souřadnic x, y, z). IMU jednotka zaznamenává gyroskopy a akcelerometry rotaci přístroje. Z parametrů GNSS a IMU jednotky se pomocí kalmanova filtru (KF) dopočítá trajektorie dráhy UAV (souřadnice a rotace). K této trajektorii se připojí bodové mračno z laserového skenu (Skaloud a kol. 2006; Cucci a kol. 2017 a Trafina 2018). Základní rovnici pro výpočet polohy je tedy (Habib a kol. 2008, Rehak a kol. 2017 nebo Zhao a kol. 2018):

$$X^m + v_X^m = X_0^m + R_c^m(\tau) \cdot A^c + S^m \quad (2.5)$$

Kde:

X^m je poloha odvozená od GNSS pro jednu epochu v kartézském souřadnicovém systému;

v_X^m je vektor reziduí UAV pozice;

X_0^m je vektor pozice centra promítání;

$R_c^m(\tau)$ je devítiprvková matice rotace transformující polohu skeneru do IMU jednotky (úhly ω, ϕ, κ);

A^c je vektor pozice GNSS antény (IMU jednotka);

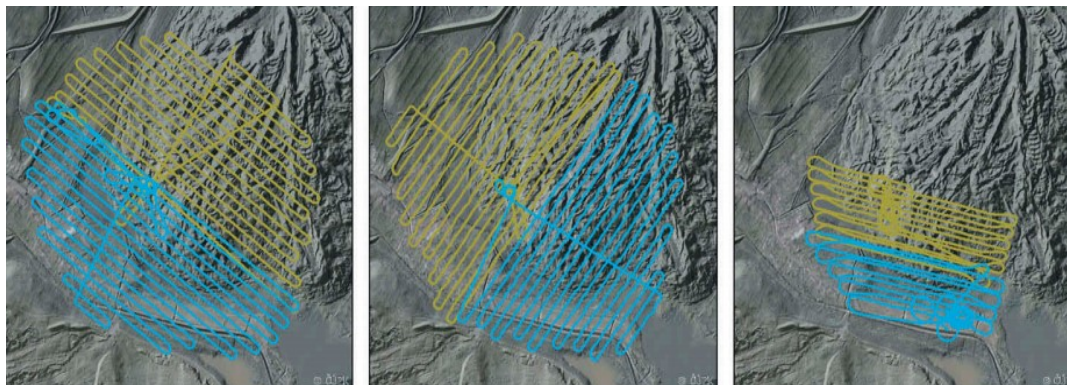
S^m je vektor přesnosti GNSS pozice dané z rozboru přesnosti.

2.2.2 Plán letu

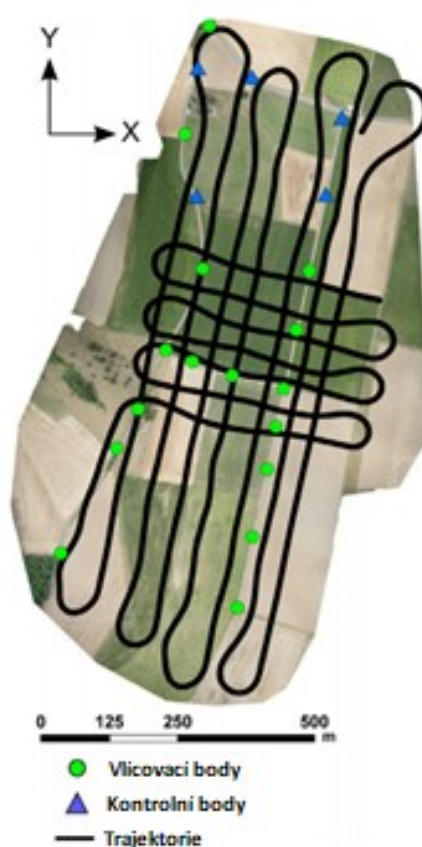
Samotné skenování probíhá automatizovaně, případně může operátor nastavit určité parametry, a to skenovanou oblast (plán letu) a hustotu skenování. Hustota skenování je charakterizována jako vzdálenost sousedních bodů v naskenovaném mračnu. Hustotu je také možné nastavit jako úhlový krok v horizontálním nebo vertikálním směru. Dalšími parametry, které lze nastavit jsou: maximální nebo minimální měřená délka nebo maximální úhel od nadiru letu (Baltsavias 1999b; Jašek 2018).

Plán letu se řídí oblastí vybranou pro skenování. Plán letu UAV je operátorem stanoven před samotným letem. Let je uskutečňován nad vybranou oblastí a standardně probíhá v jednom směru (příčný nebo podélný let, viz obr. 2.8 a 2.9). Pro větší hustotu bodového mračna je možné k příčnému směru přidat směr podélný. Jakmile je plán letu operátorem

zadán, proces skenování a letu je plně automatizován. Po uskutečnění letu jsou získaná data uložena do paměti přístroje (Persad a kol. 2015; Moudry a kol. 2019).



Obrázek 2.8: Plán letu (Moudry a kol. 2019)



Obrázek 2.9: Plán letu a umístění vlčovacích bodů (přeloženo: Cucci a kol. 2017, s. 8)

Součástí plánu letu je rozvrhnutí tzv. vlčovacích bodů. Je sice možné skenovat bez vlčovacích bodů (pouze za použití registrace IMU jednotky), přesto pro větší přesnost jsou vlčovací body používány. Před samotným letem jsou zaměřeny pozemní metodou – GNSS nebo totální stanicí.



Obrázek 2.10: Vlčovací bod – vlevo – použití terče měření Nechranická přehrada; vpravo – koule pro účely skenování – lokalita Horní Vidim

2.3 Zpracování měření UAV

2.3.1 Bodové mračno

Proces zpracování dat z laserových skenerů se u jednotlivých metod, myšleno terestrické skenování, UAV skenování nebo ALS skenování, mírně liší. Zatímco terestrické skenování probíhá pomocí stanovisek (jedno stanoviště laserového skeneru – jedno bodové mračno), při ALS a UAV skenování probíhá spojování mračen při procesu v hlavní jednotce (synchronizace laserového skeneru a IMU/GNSS). Proces zpracování kromě kalibrace probíhá u terestrického i leteckého skenování podobně (Glennie 2007; Yancho a kol. 2019).

První částí procesu zpracování je inicializace trajektorie dráhy UAV a následně transformace trajektorie do určeného souřadnicového systému. Při inicializaci trajektorie dráhy se dopočítává dráha UAV na principu transformace polohy GNSS (v určitém polohovém systému a času). Během tohoto procesu je brán zřetel na vnitřní kalibraci IMU/GNSS jednotky spolu s naskenovaným mračnem. Následně probíhá registrace metodou relativního slícování pomocí překrytu. Tato metoda spočívá v principu hledání dvou bodů v rámci dvou množin (pomocí euklidovské vzdálenosti) a porovnávání střední kvadratické vzdálenosti. Při výpočtu se využívá například metoda ICP (Iterative Closest Point), případně i jiné metody (viz Jašek 2018 cit. Štroner, 2008).

Výsledkem je bodové mračno, které charakterizuje prostorové informace o skenovaném objektu (Skaloud a kol. 2008). Součástí výstupu jsou tedy 3D souřadnice a případně další údaje (intenzita odraženého signálu, pořadí odrazu paprsku, celkový počet odrazů vyslaného signálu, šířka echa apod.). Pokud je laserový skener vybaven CCD je možné získat barevnou informaci bodů. Případně post-procesingem je možné získat barvu mračna z externě

pořízených fotografií (Wehl a kol. 1999; Jašek 2018). Jestliže chce uživatel naskenované mračno dále registrovat, je možné toto provést transformací (např. Helmertovou sedmiprvkovou transformací) přes vřícovací body.

Pro některé konkrétní účely je možné použít přímo bodové mračno. Přesto ve většině případů je potřeba zpracovat bodové mračno dle konkrétního účelu. Jednou z metod úpravy a interpretace bodového mračna je proložení mračna bodů geometrickými útvary. Výhodou této interpretace je redukce množství dat. Výsledkem pak je 3D model složený z geometricky definovaných těles. Takovéto zpracování je možné editovat v programech CAD (např. formát BIM 360 pro 3D modely budov) nebo Sketch Up (vizualizace historických objektů) apod. Tento způsob je využíván pro umělé objekty, jako je například interiér výrobních hal či elektráren. Další možnou úpravou je vytvoření drátového modelu. Tento způsob je primárně určen pro potřeby projektantů, případně architektů, jelikož hrany objektů jsou charakterizovány liniemi nebo křivkami. Další metodou zpracování jsou trojúhelníkové sítě, tj. vytvoření meshe nebo TIN. Toto zpracování vychází z předpokladu, že nelze vytvořit geometrická primitiva (křivky, linie apod.). Metoda pracuje na principu „Delaunayovy triangulace“, kdy algoritmy vypočítávají konstrukci konvexní obálky kolem jednotlivých bodů. Výsledné trojúhelníky musí být co nejvíce rovnostranné a v jejich kružnici opsané nesmí ležet žádný další bod. Tento výstup se využívá především pro přírodní objekty nebo extravilánu (Ježek 2015; Krsak a kol. 2016; Jašek 2018).

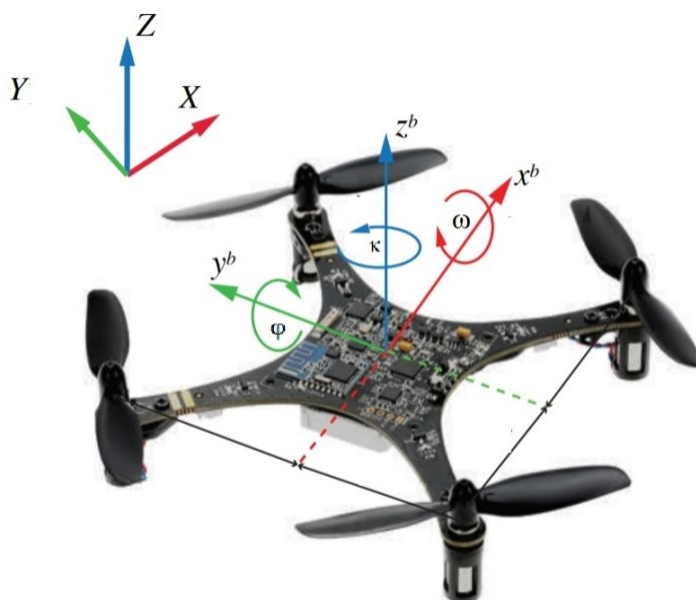
Další částí zpracování měření je filtrace a úprava dat (Yilmaz a kol. 2018). V tomto kroku je nutno odstranit nepotřebná data, případně chyby měření (šum), tedy například zachycená auta, chodce či chybné odrazy laserového skeneru. Při filtraci je třeba filtračním procesem (algoritmus filtrace) odstranit vlivy chyby měření. V tomto případě je možné taktéž klasifikovat objekty (Štroner a kol. 2008; Walsh a kol. 2013; Jašek 2018).

Posledním krokem je vizualizace bodového mračna. Vizualizovat můžeme také pouze bodové mračno. Vizualizace probíhá pomocí specializovaných programů nebo pomocí webové služby. Práci s bodovým mračnem umožňuje například open-source program CloudCompare (EDF R&D), RiProcess (RIEGL), Cyclone 3DR (Hexagon) nebo 3D Reshaper (Hexagon). Webová služba potree.org (služba github) zase umožňuje vizualizace bodových mraček pomocí webových služeb (úprava v JavaScript). Bodové mračno může být uloženo hned v několika formátech (ASCII – txt, csv; LAS cloud – las, laz – komprimovaný soubor; e57 cloud; ptx cloud; dxf geometry nebo Riegel files – rds). V případě výstupu textového

souboru (ve formátu x, y, z) je možné zobrazit bodové mračno pomocí programovacích jazyků nebo MATLABu a Octavu.

2.3.2 Kalibrační jednotky

Pro větší přesnost změřených bodů (potažmo bodového mračna) je nutno provést kalibraci IMU/GNSS jednotky (Wehl a kol. 1999). Vzhledem k relativně neměnnému systému laserového skenování, který vykazuje nepřesnost jako celek (tj. všechny body změřené laserovým skenerem mají přibližně stejnou chybu), je potřeba provést kalibrace ke vztahu IMU/GNSS jednotky. Podle Wehla (1999) nebo Řeháka (2015) se musejí brát na zřetel tyto dva parametry: poloha laserového snímače vzhledem k IMU a umístění IMU s ohledem na GNSS anténu. V zásadě se jedná o tři posuny (x , y , z) a tři úhly z IMU jednotky (ω , φ , κ) (obr. 2.11). Případně i měřítko (Stocker a kol. 2017). Tyto tři posuny, tři rotace a měřítko nazýváme kalibrační jednotky, jsou součástí každého IMU/GNSS senzoru. Tyto kalibrační jednotky mohou být součástí výstupu IMU/GNSS jednotky nebo jsou dopočítávány z metod překrytu (relativního slícování) jednotlivých pásů (Wehl a kol. 1999; Cucci a kol. 2017; Tu a kol. 2018).

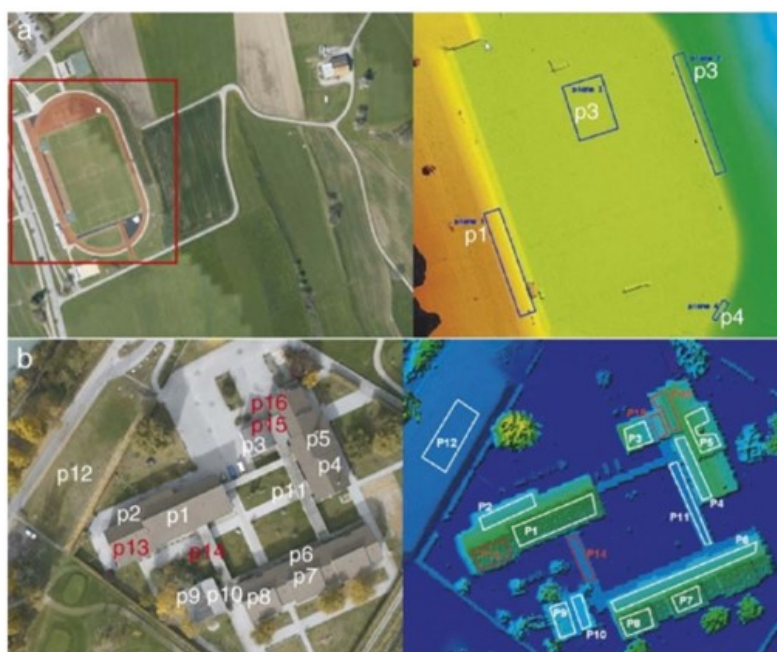


Obrázek 2.11: Posuny x , y , z a rotace ω , φ , κ (Tu a kol. 2018)

2.3.3 Kalibrace senzoru

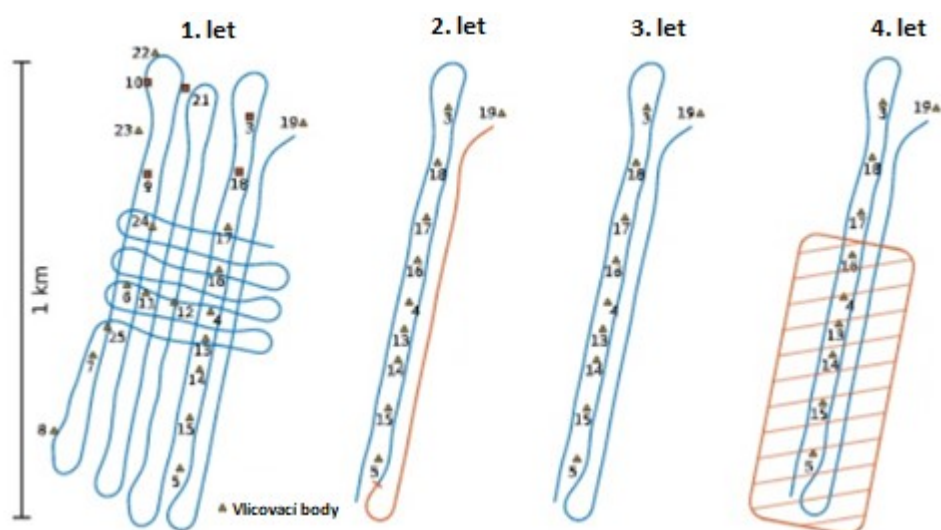
Kalibrací senzoru rozumíme proces, jehož cílem je snížit nesrovnalosti v naskenovaných pásích. Jinak řečeno, rozumíme tím úpravu sensorových parametrů (kalibračních jednotek). Po kalibraci senzoru existuje stále systematická chyba, ale je výrazně nižší (Stocker a kol. 2017). Princip kalibrace pomocí rozdělení pásů se snaží minimalizovat rozdíly jednotlivých pásů pro daný transformační model. Pracuje na bázi vyrovnaní metodou nejmenších čtverců (Gruen a kol. 2005; Skaloud a kol. 2006; Habib a kol. 2008 a Wang a kol. 2010; Stocker a kol. 2017) nebo se zavedením Gauss-Markoffova modelu (Akca a kol. 2006). Tento model získává relativně objektivní odhad minimálního rozptylu pro neznámé parametry (Wang a kol. 2010). Další používaný model k metodě nejmenších čtverců je zavedení robustní metody (Habib a kol. 2008).

Kalibraci senzoru lze provést pomocí více metodami, které všechny vycházejí z principu MNČ. Například Wehl (1999) nebo Skaloud (2006) uvádějí, že tuto kalibraci senzoru je vhodné odvodit z kalibrace IMU/GNSS pomocí referenčních ploch (jako např. rovinatý terén, velké sportovní hřiště nebo stadiony a rohy budov). Kalibraci provádí z orientace a polohy různých rovinných ploch a slícování jejich absolutní polohy v polohovém souřadnicovém systému (obr. 2.12).



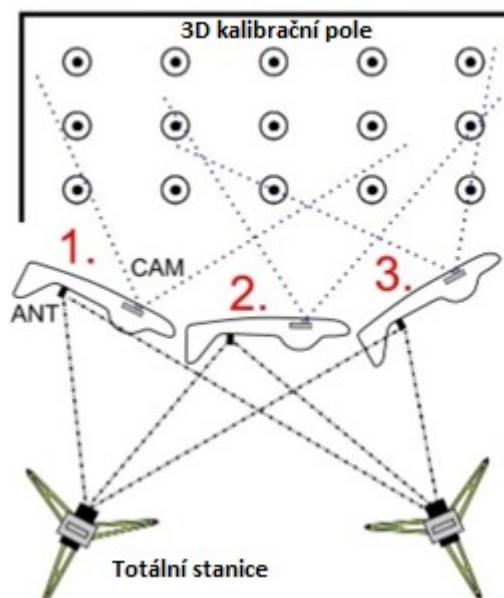
Obrázek 2.12: Porovnání vhodnosti využití stadionu a zastavěné plochy pro potřeby kalibrace (Skaloud a kol. 2006, s. 52)

Další možnou variantou kalibrace jsou dle Wehla (1999) nebo Cucciho (2017) přelety různými směry (obr. 2.13). Stocker (2017) uvádí, že právě tyto křížové lety zlepší výslednou přesnost slícování naskenovaných bodových mračen.



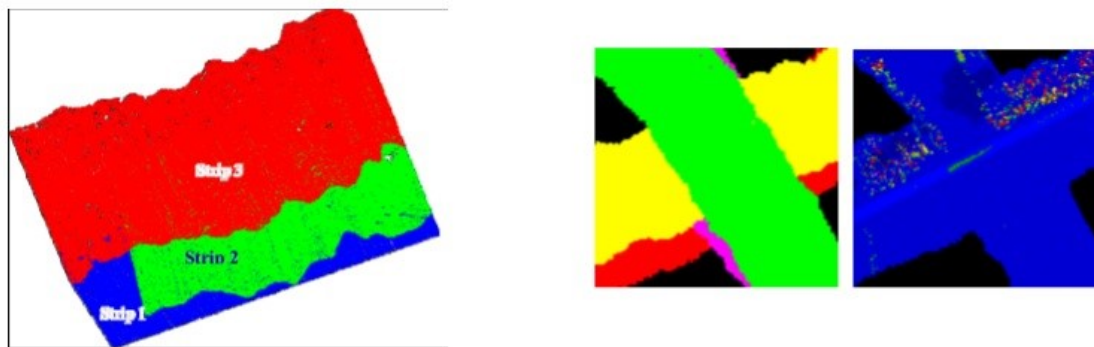
Obrázek 2.13: Přelety různými směry (trajektorie UAV) (přeloženo: Cucci a kol. 2017, s. 8)

Pro velmi přesnou kalibraci senzoru je možné využít kalibrační pole na malém prostoru. Rehak (2015) provádí kalibraci senzoru IMU/GNSS na rovné střeše stavebního objektu o rozměrech 10 x 10 metrů. Body kalibračního pole a anténa UAV mohou být v této metodě zaměřeny totální stanicí (obr. 2.14) (Rehak a kol. 2015; Zhao a kol. 2015).



Obrázek 2.14: Schéma kalibrace při použití zaměřených bodů a antény UAV (přeloženo: Rehak a kol. 2015, s. 26)

Další možností je využít rozdělení bodového mračna na tzv. pásy. Trajektorie letu se rozdělí na úseky. Následně se použije bodové mračno pouze z jedné etapy letu a porovnává se s dalším pásem (Habib a kol. 2008; Wang a kol. 2010).



Obrázek 2.15: Bodové mračno rozdělené na jednotlivé pásy (vlevo Habib a kol. 2008; vpravo Wang a kol. 2010)

Všechny tyto metody vycházejí ze stejného matematického odvození MNČ (viz dále).

2.3.4 Výpočet parametrů kalibrace

Základními parametry kalibrace senzoru jsou tři úhly rotace (ω , ϕ , κ), tři posuny (t_x , t_y , t_z) a měřítko m (měřítko někteří autoři opomíjejí). Tyto prvky tvoří sedmiprvkovou konformní transformaci, při které se body z množiny S_2 transformují do množiny S'_2 . Tato transformace minimalizuje vzdálenost k množině S_1 . Vzdálenost bodu $l \in S'_2$ od roviny $(P, Q, R) \subset S_1$ je dána rovnicí:

$$D = \frac{|a \cdot x_i + b \cdot y_i + c \cdot z_i - d|}{\sqrt{a^2 + b^2 + c^2}} \quad (2.6)$$

Kde a, b, c, d jsou funkcí $P(x_P, y_P, z_P)$, $Q(x_Q, y_Q, z_Q)$ a $R(x_R, y_R, z_R)$ (Habib a kol. 2008; Wang a kol. 2010).

Pro hledání lokálního minima je nyní potřeba aproximovat vzdálenost D . Použijeme Taylorův rozvoj 1. řádu.

Linearizace dle Wanga (2010) (také Novák a kol. 1998: „vyrovnání měření“ a Skaloud a kol. 2006):

$$D' \sim D_0 + \frac{\partial D}{\partial \omega} \Delta \omega + \frac{\partial D}{\partial \varphi} \Delta \varphi + \frac{\partial D}{\partial \kappa} \Delta \kappa + \frac{\partial D}{\partial t_x} \Delta t_x + \frac{\partial D}{\partial t_y} \Delta t_y + \frac{\partial D}{\partial t_z} \Delta t_z + \frac{\partial D}{\partial m} \Delta m \quad (2.7)$$

Kde D_0 je počáteční odhad vzdálenosti D daných nevyrovnanými parametry $\Delta \omega, \Delta \varphi, \Delta \kappa, \Delta t_x, \Delta t_y, \Delta t_z$ a Δm .

Definujeme V , jež je rozdílem mezi aproximovanou vzdáleností D' a skutečnou vzdáleností D :

$$D = D' - V \quad (2.8)$$

Kde V je řešení vyššího řádu Taylorova rozvoje. V iteračním procesu je to vždy derivace vyššího řádu, než je řád při výpočtu D' . Výsledkem je difference nevyrovnaných parametrů. Při dalším kroku předpokládáme nulový posun vypočtených povrchů. Položíme proto $D = 0$. Následně můžeme zapsat:

$$V = D_0 + \frac{\partial D}{\partial \omega} \Delta \omega + \frac{\partial D}{\partial \varphi} \Delta \varphi + \frac{\partial D}{\partial \kappa} \Delta \kappa + \frac{\partial D}{\partial t_x} \Delta t_x + \frac{\partial D}{\partial t_y} \Delta t_y + \frac{\partial D}{\partial t_z} \Delta t_z + \frac{\partial D}{\partial m} \Delta m \quad (2.9)$$

Takto výpočet probíhá, když rovnice 2.8 je rovna blízké nule. Následně spočteme vektor reziduí:

$$V = L + AX \quad (2.10)$$

Kde A je matice plánu (jednotlivé derivace nevyrovnaných proměnných), V je vektor reziduí, L je vektor měření a X je vektor oprav (Skaloud a kol. 2006; Wang a kol. 2010). Podle Skalouda (2006) je oprava měřítka zanedbatelná, proto ho lze z výpočtu vyloučit (nalezené plochy slícování jsou většinou velmi malé oproti skenované oblasti).

Pro výpočet směrodatné odchylky využijeme výpočtu střední chyby neznámých. Nejprve je nutno si definovat vektor vyrovnaných měření:

$$\bar{L} = L + V \quad (2.11)$$

Kde \bar{L} je vektor opravených měření.

Následně využijeme lineárního zobrazení (Wolf a kol. 1997 nebo Hampacher a kol. 1997):

$$X = -(A^T A)^{-1} A^T \bar{L} \quad (2.12)$$

A poté odvodíme:

$$\Sigma_{XYZ} = -(A^T A)^{-1} A^T A (A^T A)^{-1} = (A^T A)^{-1} \quad (2.13)$$

Dostaneme kovarianční matici neznámých:

$$\Sigma_{XYZ} = \begin{bmatrix} \sigma_\omega^2 & \cdots & \sigma_{t_z \omega} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \sigma_{\omega t_z} & \cdots & \sigma_{t_z}^2 \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

■ dle postupu Wolfa (1997); Skalouda (2006) a Habiba (2008). Na diagonále se nacházejí směrodatné odchylky jednotlivých parametrů. Následně spočteme směrodatnou odchylku, a to pomocí vektoru reziduí a matice plánů (vektor oprav v české literatuře, viz Hampacher a kol. 1997):

$$v = AX - L \quad (v = A\hat{x} - l \text{ viz Hampacher a kol. 1997}) \quad (2.15)$$

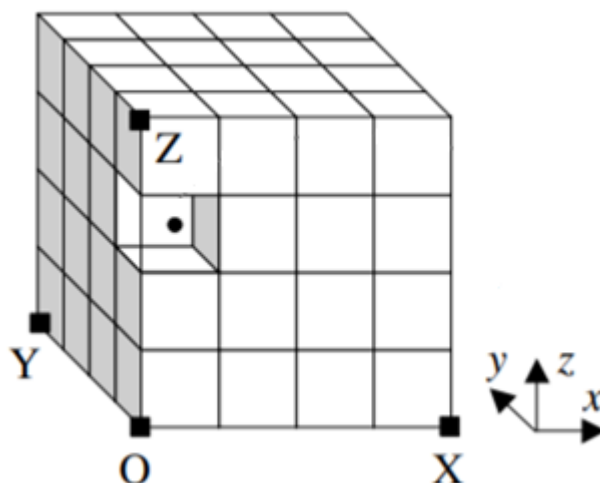
Poté vypočteme směrodatnou odchylku (Akca a kol. 2006):

$$\sigma = \sqrt{\frac{v^T v}{n-1}} \quad (2.16)$$

Tento iterační výpočet se provede pro p – bodů a q – ploch. Následně můžeme odvodit (Skaloud a kol. 2006):

Podmínky:	$m = p$
Neznámých:	$u = 6 + 6q$
Měřených veličin:	$n = 6n$
Stupně volnosti:	$r = p - 4 - 3q$

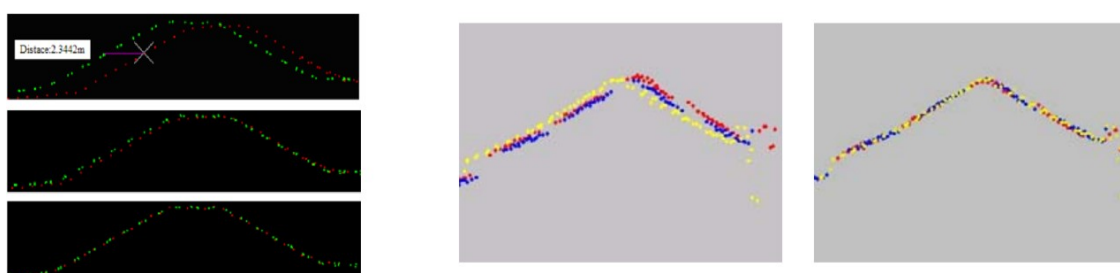
Výběr ploch odpovídá třem základním parametrům: rádius hledaných bodů, úhlové toleranci a maximální vzdálenosti normály plochy. Tyto parametry jsou určující pro hledání ploch. Zatímco hledání v poloze určuje velikost hledané plochy, úhlová tolerance určuje maximální sklon roviny. Tento parametr je využíván z důvodu hledání například střech domů. Maximální vzdálenost normály plochy zase určuje, o kolik mohou být jednotlivé hledané plochy od sebe výškově vzdáleny. To znamená, že se jedná o vzdálenost podél normál hledaných ploch. V zásadě se tudíž jedná o definování pole hledání ploch (více se o parametrech zmiňuje Akca (2006)).



Obrázek 2.16: 3D Box, vymezení dle parametrů (Akca a kol. 2006, s. 189)

2.3.5 Ověření přesnosti kontrolními body

Samostatnou kapitolou týkající se kalibrace senzoru UAV, je ověření výsledku. K validaci výsledku kalibrace senzoru IMU/GNSS můžeme přistupovat dvěma způsoby. Prvním způsobem je praktický přístup, kdy se nad určitým objektem udělá příčný řez (viz Obr. 2.17). Tento způsob má však svoje úskalí. Závisí především na rozmanitosti skenovaného objektu. Není vhodný pro objekty, kde je velký naskenovaný šum, například pro lesní porost. Naopak je vhodný pro zástavbu, u které je možné porovnávat stavební objekty (Habib a kol. 2008; Wang a kol. 2010).



Obrázek 2.17: Příčný řez – před kalibrací a po kalibraci senzoru – praktický přístup (vlevo – Wang a kol. 2010; vpravo – Habib a kol. 2008)

Druhý způsob validace dat je analytický, kdy na kontrolních bodech jsou měřena rezidua dvou měření. Kontrolní body jako validaci využívá mnoho autorů (viz Habib a kol. 2008; Rehak a kol. 2013; Urban a kol. 2018 nebo Zieher a kol. 2019). Taktéž je vhodné zmínit, že kontrolní body mohou být vlíčovací; ty jsou primárně využívány pro transformaci bodového

mračna do souřadnicového systému (případně s využitím IMU/GNSS jednotky k dotransformaci bodového mračna a zlepšení jeho absolutní přesnosti) (Grigillo a kol. 2018).

Způsob měření dvou reziduí je založen na geometrickém rozložení objektů měření. Je to stejný analytický způsob jako při kalibraci senzoru, ovšem s tím rozdílem, že difference nejsou v rámci ploch, ale bodů. Tyto body mohou být zaměřeny geodetickou metodou (Koska a kol. 2017; Blistan a kol. 2016) nebo mohou být určeny druhým bodovým mračnem (Urban a kol. 2018). Výpočet vychází z předpokladu:

$$\Delta_{pi} = \sqrt{\Delta_{xi}^2 + \Delta_{yi}^2 + \Delta_{zi}^2} . \quad (2.17)$$

Kde Δ_{xi} , Δ_{yi} a Δ_{zi} jsou rozdíly souřadnic dvou rozlišovaných bodů (Urban a kol. 2018). Můžeme tak spočítat střední kvadratickou odchylku a směrodatnou odchylku.

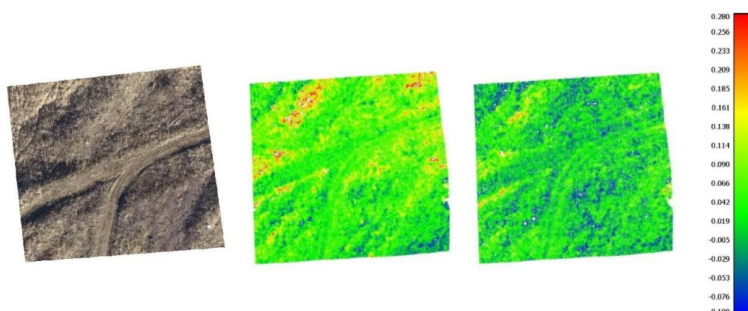
Střední kvadratická odchylka se spočte (Koska a kol. 2017; Urban a kol. 2018):

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - x_{REF})^2}{N}} \quad (2.18)$$

A směrodatná odchylka:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}{N-1}} \quad (2.19)$$

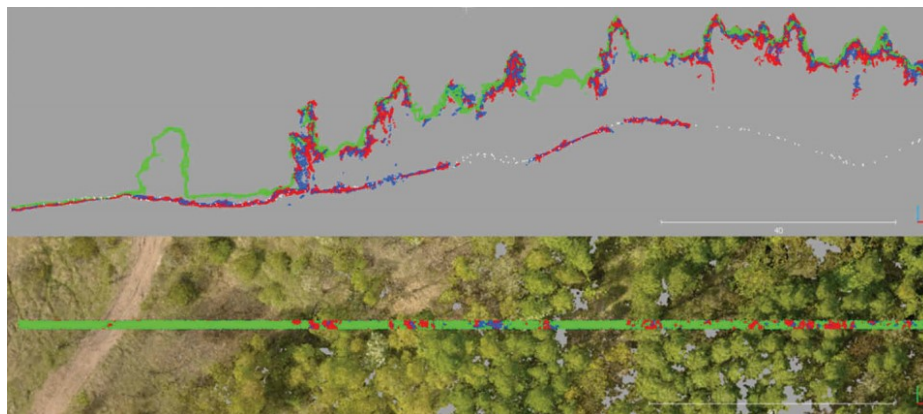
Tento postup je analyticky stejný jako při výpočtu kalibrace senzoru. V tomto případě jsou však porovnávány body, nikoli plochy (odvození je viz Urban a kol. 2018).



Obrázek 2.18: Výškové rezidua dvou vybraných naskenovaných mračen (Urban a kol. 2018, s. 334)

Stejně tak jako lze porovnávat a určovat vzájemnou geometrii bodů v bodovém mračnu, lze porovnávat dvě mračna (Urban a kol. 2018). Je možné porovnávat dvě mračna změřená nezávisle na sobě – jeden přístroj a dvě nezávislá měření (např. Habib a kol. 2008) (obr.

2.19). Nebo je možné porovnávat dvě bodová mračna získaná rozdílnou metodou – UAV a pozemní skener (Elsner a kol. 2018), UAV a TLS (Baltsavias 1999a), UAV a fotogrammetrie (Blistan a kol. 2016). Pro zobrazení rozdílů jednotlivých bodových mračen je vhodné vytvořit mesh.



Obrázek 2.19: Příčný profil a rozdíly tří naskenovaných mračen (Koska a kol. 2017)

3. Zájmové území a použitá data

3.1 Zájmové území

Zájmové území (experimentální oblast / testovací plocha) bylo vybráno s ohledem k rozmanitosti reliéfu. Modelové území se nacházelo v obci Horní Vidim v okrese Mělník. Tato obec se leží na území chráněné krajinné oblasti Kokořínsko. Jako skenovaná oblast (oblast zájmu) byl vybrán jižní cíp obce. Na ortofotu lze spatřit, že se v oblasti nachází travní porost, asfaltová cesta, polní cesta, betonová plocha, budovy (kaplička pod velkým stromem), trafostanice, posečené pole a remízky. V jižní části skenované oblasti byla místní skládka bioodpadu. V severní části skenované oblasti se stojí dvě budovy, které jsou však zakryty zeleným porostem. Převýšení v této skenované oblasti není velké. Nachází se zde pouze násyp polní cesty. Co se týká objektů, v této oblasti pro skenování dominantních, roste zde vysoký strom nad kapličkou a stojí zde sloupy nízkého napětí.

Tato lokalita byla vybrána právě pro tuto svou rozmanitost. Elsner (2018) a Skaloud (2006) se zmiňují, že pro co nejlepší výsledky slícování dat, kalibrace nebo porovnání ruční GNSS a UAV měření je vhodná právě lokalita s největší rozmanitostí povrchu reliéfu a zároveň s co nejmenším podílem vysoké vegetace. Předpokladem pro co nejlepší kalibraci senzoru je tedy co největší rozdíl odrazivosti jednotlivých ploch.



Obrázek 3.1: Experimentální oblast Horní Vidim – ortofoto (Mapy.cz)

Pro validaci výsledků pomocí porovnávání bodových mračen (fotogrammetrie, skenování multistanicí) byl vybrán objekt trafostanice, který není zakrytý žádnou vegetací. Je navíc méně členitý, a proto jsou výsledné technické řezy tímto objektem vhodné pro porovnání metod skenování.



Obrázek 3.2: Trafostanice

3.2 Použitá data UAV

Pro kalibraci senzoru byla použita data z přístroje RIEGL miniVUX-1UAV ve formátu RDS (*Riegl Data Scan*), která obsahují databázi souřadnic bodů. Data jsou organizována jako jednotlivé skeny jednoho směru letu, tzn. že jsou rozdělena na pásy. Celé bodové mračno obsahuje 35 632 196 bodů.

Výsledkem měření bylo naskenování pěti příčných a pěti podélných pásů. V názvu jednotlivých souborů je uveden čas počátku skenování ve formátu (RR/MM/DD_HH:MM:SS).

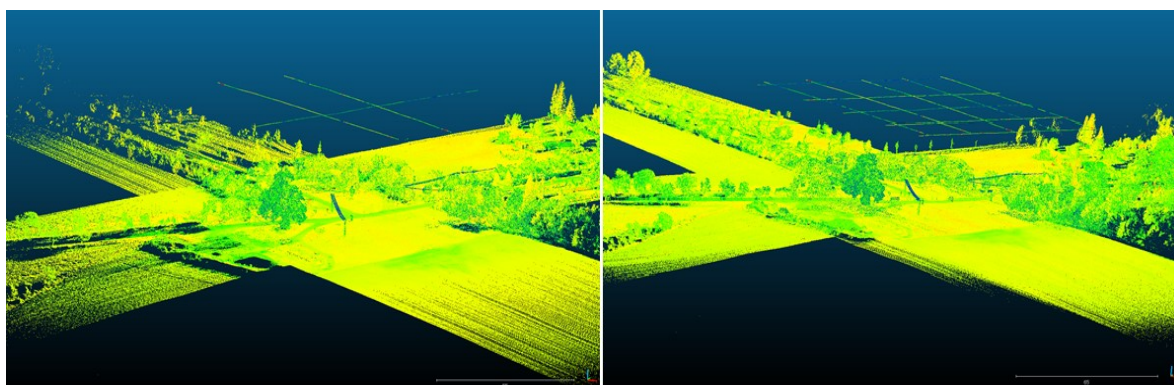
Příčné pásy:

- 191015_122844
- 191015_123005
- 191015_123131
- 191015_123252

- 191015_123410

Podélné pásy:

- 191015_123531
- 191015_123651
- 191015_123815
- 191015_123938
- 191015_124104



Obrázek 3.3: Trajektorie letu UAV a zobrazení naskenované oblasti (vlevo – tři vybrané pásy; vpravo – všechny naskenované pásy)

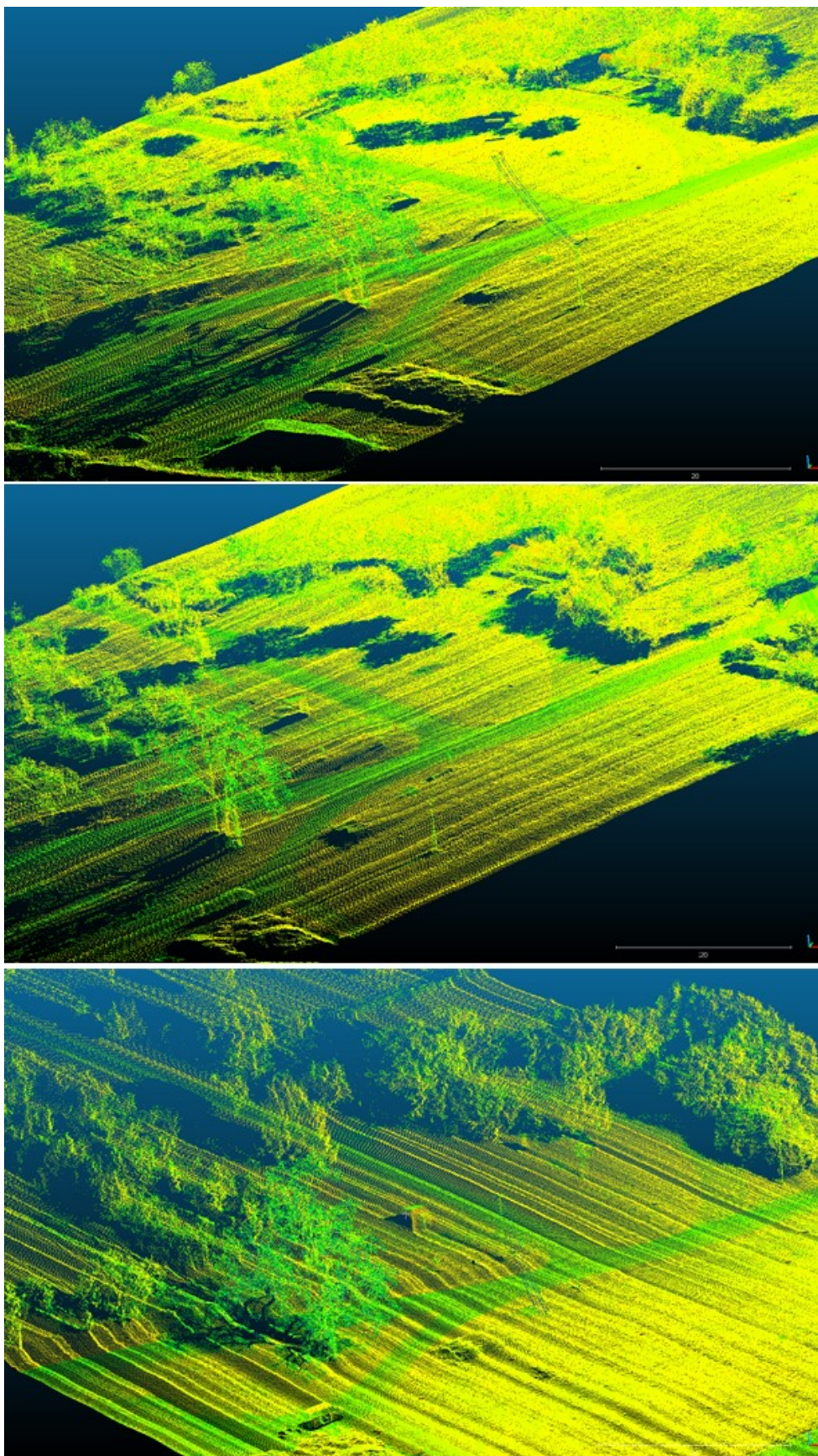
Z charakteristiky použité metody kalibrace senzoru byly speciálně vybrány tři naskenované pásy. Tyto tři naskenované pásy byly vybrány z důvodu blízkého nadiru letu u objektu trafostanice. Důvodem vybrání tří pásů, jež dva jsou příčné a třetí je na ně kolmý, je taktéž i kontrola metodiky průběhu letu, kdy se předpokládá zlepšení přesnosti výsledného bodového mračka při skenování v různých směrech letu (viz úvod).

Dva pásy představují dva na sebe kolmé pásy. Označíme je jako „kom. 1“.

- 191015_123252
- 191015_123410

A jeden předchozí pás (191015_123410) použijeme jako kombinaci s třetím vybraným pásem jako dva překrývající se pásy. Označíme je jako „kom. 2“.

- 191015_123410
- 191015_123531



Obrázek 3.4: Naskenované pásy (nahore – 191015_123252; uprostřed – 191015_123410; dole – 191015_123531)

3.3 Použitá data pro validaci

Pro zaměření vlíčovacích, případně kontrolních bodů, bodů objektu a bodů terénu byla použita data z multistanice Leica MS60 a GNSS přijímače Leica GS16. Při měření GNSS přijímačem byla exportována data v textovém formátu a konfigurací X, Y, Z v systému JTSK. Z totální stanice byly exportovány souřadnice ve formátu GSI (*Golden Software Interchange File*). Součástí formátu GSI bylo číslo bodu, vodorovný úhel, zenitový úhel, měřená délka a výška cíle. Dále pak byl naskenován objekt multistanicí ve formátu E57.



Obrázek 3.5: Foto experimentální oblasti. Vlícovací body. nahoře – zaměřený patník; vlevo dole – terč; vpravo dole – koule

Součástí validace dat bylo i použití fotogrammetrie. Nafocení objektu proběhlo pomocí objektivu mobilního přístroje Apple iPhone 11. Součástí vlastností souborů JPG jsou taktéž přibližné polohy mobilního přístroje při focení.



Obrázek 3.6: Koláž vybraných fotek pro fotogrammetrii

4. Metodika

4.1 Výběr metodiky

Na základě znalostí problematiky a provedené rešerše jsem se rozhodl použít pro kalibraci IMU/GNSS jednotky spojení dvou metod. První metodou je rozčlenění naskenovaného bodového mračka na jednotlivé naskenované pásy. Dle Habiba (2008) i dle Wanga (2010) je tato metoda velmi přesná a poskytuje dobré výsledky slícování. Výhodou této metody je podle Habiba (2008) její rychlost a vysoká spolehlivost. Tato metoda spočívá pouze na rozdělení bodového mračka na jednotlivé naskenované úseky rozdělené vždy, když je změněn směr trajektorie letu.

Druhá metoda se váže na charakter trajektorie letu, a je to vytvoření příčných a podélných naskenovaných pásů. Tato metoda předpokládá, že je proveden tzv. křížový let (Stocker a kol. 2017). Například Cucci (2017) hodnotí, že provedený postup příčných a podélných naskenovaných pásů zvyšuje celkovou přesnost mračka, nehledě na post-processing. S tím souvisí i lepší slícování jednotlivých naskenovaných pásů, kdy objekty jsou více slícované, a nevzniká přílišný šum v naskenovaných datech. Proto je vhodné plán letu koncipovat tak, aby byly naskenovány jak příčné, tak podélné pásy. V tomto případě byl let koncipován tak, že bylo naskenováno pět příčných směrů a pět na ně kolmých směrů.



Obrázek 4.1: Metody kalibrace IMU/GNSS, vybrané metody – vlevo (Habib a kol. 2008); uprostřed (Wang a kol. 2010); vpravo (Cucci a kol. 2017, s. 8)

Cucci (2017) se taktéž zmiňuje o tom, že kvalitu slícování jednotlivých bodových mračen zlepšuje vyšší počet vlíčovacích bodů. Přesněji řečeno, navrhuje, aby byly jednotlivé pásy transformovány a registrovány na jednotlivé vlíčovací body a až poté aby byla provedena

kalibrace IMU/GNSS. Takto se zvýší i absolutní přesnost bodového mračka v rámci referenčního polohového systému (Rehak a kol. 2013).

Hlavním krokem přesto zůstává zjistit relativní přesnost naskenovaných pásů. V kontextu kalibrace komunikace senzorů IMU a GNSS je třeba zmínit, že posun a rotace naskenovaných bodových mračen (naskenované pásy) odpovídají jedné ze systematických chyb přístroje UAV. Podle Stockera (2017) je největší systematickou chybou měření kalibrace IMU jednotky. Vliv GNSS je přesto nezanedbatelný. Jak IMU jednotka, tak komunikace mezi IMU a GNSS jednotkou mají stejné kalibrační jednotky – rotaci, posun a měřítko. Rehak (2013) zmiňuje, že vliv měřítka je přesto velmi malý. Kalibrací senzoru IMU/GNSS se tímto tedy snažíme snížit vliv těchto kalibračních jednotek. Pokud tyto systematické rotace a posuny aplikujeme na veškerá naskenovaná bodová mračka, zvýší se relativní přesnost těchto mračen. To znamená, že hrany jednotlivých naskenovaných objektů budou více slícované. Tím se sníží geometrická nepřesnost těchto objektů. Naskenovaný šum se však nesníží, obzvláště v případě přírodních objektů zde bude stále prostor pro filtraci nebo klasifikaci bodového mračka (uvádí např. Hyypä a kol. 2020).

Kalibrační parametry roztřídíme do dvou skupin. První je výpočet kalibračních jednotek IMU jednotky. Je to systematická chyba daná vlastností přístroje a je vypočtena z akcelerometrů a gyroskopů v IMU jednotce (Bakule a kol. 2016). Vliv této systematické chyby měření je velmi zřetelný, proto je ho potřeba brát v potaz při každém měření, je součástí všech následných výpočtů, nehledě na případnou další kalibraci. Druhou skupinou je kalibrace IMU/GNSS komunikace senzorů pomocí naskenovaných pásů. Každý jednotlivý pás má jiné vypočítané kalibrační jednotky (posun a rotaci). Wang (2010) doplňuje, že tyto kalibrační jednotky jsou velmi malé, ale pro potřebu menšího šumu a především odstranění systematické chyby IMU/GNSS je vhodné vždy posun a rotaci jednotlivých pásů vypočítat a aplikovat. Co se týká vlivu rotace a posunu naskenovaných pásů Wang (2010) uvádí, že primárně je patrný vliv posunu, kdy se bere v potaz charakter GNSS přesnosti. Naopak vliv rotace na výslednou přesnost není tak markantní, jelikož jí ovlivňuje kalibrace IMU senzoru.

Jak jsem již v předchozích kapitolách zmínil, při výpočtu je nutné zohlednit parametry slícování ploch. Autoři (např. Gressin a kol. 2012 nebo Moon a kol. 2019) se neshodují, jaké se přesně mají nastavit parametry, ale zmiňují, že je vhodné zohlednit charakter skenovaného území. Třemi parametry, které se standardně nastavují, jsou: hledání bodů v poloze, úhlová tolerance a maximální vzdálenost normály. Rádus hledaných bodů v poloze nám určuje

velikost plochy, která se má slícovat s druhou plochou druhého bodového mračna. Úhlová tolerance nám určuje maximální sklon dvou ploch mračen. A třetí parametr určuje jejich maximální výškovou odchylku, respektive vzdálenost podél normály středu jedné a druhé plochy. Ve velmi hustě zastavěném území je vhodné zvolit velkou úhlovou toleranci, kvůli velkému počtu střech se zde najde více ploch pro slícování. Naopak v rovinném území je vhodné nastavit menší úhlovou toleranci. Pro členité území je vhodné zvolit menší velikost plochy pro slícování a například pro plochu porostlou vyšší vegetací je vhodné zvolit větší vzdálenost normály dvou ploch. Výsledkem je poté počet ploch, které se slícují. Po provedení slícování je vypočtena směrodatná odchylka. Pokud se využijí kalibrační jednotky jednotlivých pásů, vypočtená směrodatná odchylka bude menší (Habib a kol. 2008).

Hlavním krokem analýzy je výpočet směrodatné odchylky v závislosti na započítání vlivu rotace nebo posunu IMU/GNSS senzoru. Využijeme předpokladu, že dva na sebe kolmé naskenované pásy mají mít větší přesnost. Za druhé budeme také porovnávat pásy, které jsou naskenovány stejným směrem. Předpokládá se, že při započítání kalibrace senzoru se velmi zvýší přesnost. Habib (2008), Wang (2010) i například Rehak (2013) uvádějí zpřesnění výsledného mračna ve směrodatné odchylce o 0,1 metru.

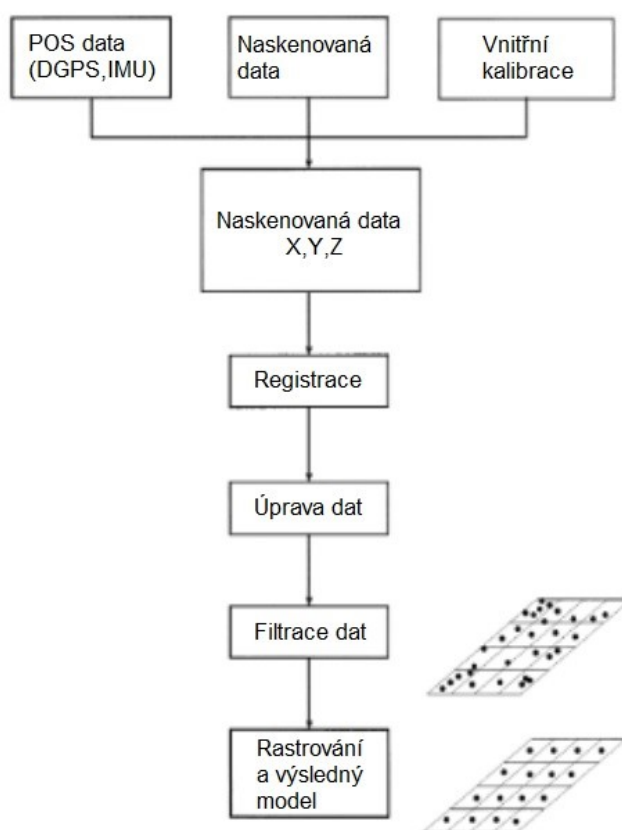
Validaci výsledků provádí každý autor jinak. Zatímco většina se přiklání k použití kontrolních bodů (Skaloud a kol. 2006; Wang a kol. 2010; Persad a kol. 2015 nebo Elsner a kol. 2018), někteří porovnávají dvě bodová mračna, získaná různými metodami (Koska a kol. 2017; Tu a kol. 2018). Také je možné porovnávat příčné nebo podélné řezy slícovaného bodového mračna (Habib a kol. 2008) nebo v případě geotechnických oborů výsledná DMT získaná dvěma metodami (Gruen a kol. 2005). Co se týče větších naskenovaných oblastí vyberou se objekty (například stavební), u kterých je možné provést porovnání nebo řezy.

Pro validaci výsledků jsem zvolil hned několik metod. První metodou je porovnání objektu, přičemž se porovnává bodové mračno získané z UAV s bodovým mračnem získaným fotogrammetrií (průseková fotogrammetrie) a s bodovým mračnem získaným z pozemního skeneru (mustistanice). Jako doplňkovou metodu validace dat, která je spíše rychlým testem slícování dat, jsem zvolil příčný řez objektem. Tato validace je vhodná pro zobrazení maximálně tří naskenovaných pásů. Za poslední metodu validace, která vychází z předpokladu geometrie a výpočtu vzdáleností, jsem zvolil kontrolu kontrolními body (tyto body byly využity jako vlíčovací), jako například Koska (2017).

4.2 Zpracování dat

4.2.1 Předzpracování

Data UAV je potřeba upravit a předzpracovat pro potřebnou analýzu. Zpracování měření UAV je složeno z několika kroků, které jsou na sobě částečně závislé (více v Obrázek 4.2). Primárně je potřeba zinicilizovat trajektorii letu UAV. Tento proces probíhal v programu *POSPac*. Výsledkem je dopočítaná dráha letu UAV. V rámci procesu je možné transformovat trajektorii letu do vybraných polohových a výškových referenčních systémů. V našem případě nebylo potřeba vybírat žádný referenční systém. Výsledná trajektorie tak byla v polohovém systému ETRS89.



Obrázek 4.2: Proces zpracování leteckých laserových dat (přeloženo: Wehl a kol. 1999, s. 79)

Při zpracování dat a neuvažování výpočtu kalibračních jednotek a jejich zohlednění je následně zobrazeno bodové mračno (Naskenovaná data X, Y, Z). Poté probíhají další úpravy, jako je registrace dat, úprava dat, filtrace dat a následně je získán výsledný 3D model.

4.2.2 Zpracování dat UAV

Po výpočtu trajektorie letu byla v programu *RiPROCESS* vypočtena bodová mračna z údajů laserového skeneru a synchronizace letu. Současně byla bodová mračna rozdělena na jednotlivé pásy. V tomto případě je vhodné použít vizualizaci bodových mračen. Tímto bylo zkontrolováno měření.

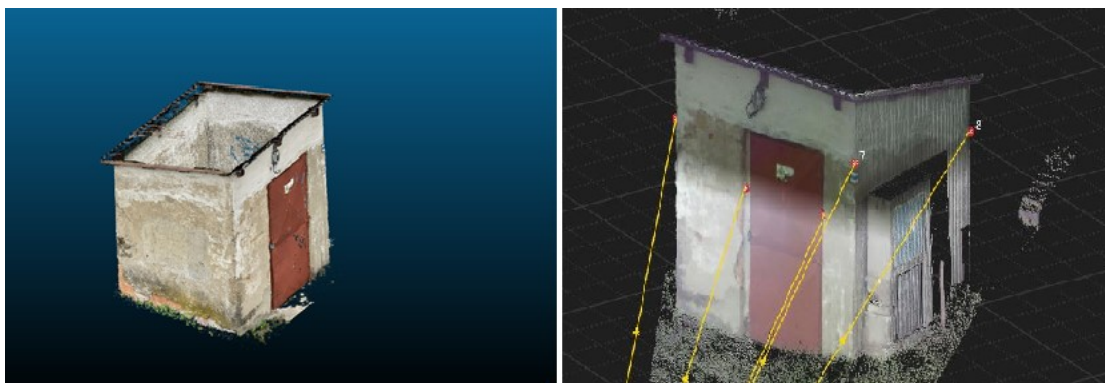
Následně byly vypočteny kalibrační jednotky, a to jak laserového přístroje, tak z vypočtených pásů. Pro kalibraci senzoru byly vybrány tři různé kombinace: kalibrace senzoru u všech pásů, dva příčné pásy (naskenované ve stejném směru letu UAV) a dva kolmé pásy (naskenované pásy dvou kolmých směrů letu UAV). Výsledkem byly směrodatné odchylky.

4.2.3 Zpracování dat pro validaci

Pro výpočet bodového mračna z fotogrammetrie pomocí průsekové metody (viz Pavelka (2009) kapitola Průseková fotogrammetrie) jsem zvolil program RealityCapture, kdy jsem si objekt trafostanice nafotil vždy jednu stranu stavby z pěti úhlů. Poté jsem nafotil detaily této stavby. V programu jsem následně dopočítal bodové mračno. Jelikož pro porovnání s bodovým mračnem UAV nebudeme uvažovat absolutní přesnost, ale pouze relativní, bodové mračno z fotogrammetrie pouze v místním polohovém systému a bylo zvoleno jako referenční. Všechna ostatní vytvořená mračna byla pomocí softwaru CloudCompare natransformována na toto bodové mračno.

Pro výpočet bodového mračna z multistanice byly použity softwary Cyclone 3DR a Infinity. Jelikož byla totální stanice použita pro zaměření bodového pole v naskenované oblasti, bodové mračno bylo umístěno v systému JTSK. Následně byla bodová mračna z UAV porovnána v programu CloudCompare a byla vytvořena vizualizace odchylek změřených z těchto dvou metod.

Další částí bylo zpracování GNSS měření a porovnání reziduí na naskenovaných kontrolních bodech. Tato rezidua byla vypočtena v programu Infinity pomocí klasické euklidovské vzdálenosti. Tímto se i bodové mračno z UAV registrovalo do systému JTSK.



Obrázek 4.3: Vlevo – model z fotogrammetrie (sw CloudCompare); vpravo – bodové mračno z multistanice (sw Infinity)

5. Výsledky

V následujících kapitolách jsou představeny výsledky provedených výzkumů, jež jsou obsaženy v předchozí kapitole. Výsledky jsou rozděleny na několik dílčích kroků. První část je nastavení parametrů hledání společných ploch slícování. Tyto parametry byly použity pro následující kapitoly.

Dále jsou výsledky výpočtu směrodatných odchylek jednotlivých kombinací. V závěru jsou uvedeny výsledky provedení validace z kalibrovaných bodových mračen.

5.1 Parametry hledání společných ploch slícování pásů

Pro výpočet kalibrací byly zvoleny parametry, které jsou primárně nastaveny v softwaru RiPROCESS, a to 0,2 metru hledání bodů v poloze, 1 ° úhlové tolerance a 0,02 metru maximální vzdálenosti normály. Tyto parametry jsou doporučovány pro odkrytý rozmanitý terén.

Použité kombinace zvolených pásů	Hledání bodů v poloze [m]	Úhlová tolerance [°]	Maximální vzdálenost normály [m]	Nalezených ploch
Kom. 1	0.2	1	0.02	405
Kom. 2	0.2	1	0.02	354
Všechny pásy	0.2	1	0.02	2911

Tabulka 5.1: Parametry pro hledání slícovacích ploch

Výsledkem bylo pro kombinaci 1 (dva na sebe kolmé pásy) 405 nalezených ploch pro slícování, pro kombinaci 2 (dva příčné pásy) 354 ploch pro slícování a pro výpočet pro všechny pásy 2911 ploch. Tyto observace byly použity pro všechny následné výpočty směrodatných odchylek při výpočtu kalibračních jednotek.

5.2 Dva na sebe kolmé pásy (Kom. 1)

Pro dva na sebe kolmé pásy jsme spočítali níže uvedené směrodatné odchylky. Posuny a rotace pásů jsou uvažovány jako výpočet kalibračních jednotek IMU/GNSS senzoru.

Zvolené kalibrační jednotky	Směrodatná odchylka [m]
Žádné kalibrační jednotky	0.024
Jen posun pásů	0.015
Jen rotace pásů	0.017
Rotace a posun pásů	0.015
Kalibr. IMU senzoru	0.015
Kalibr. IMU senzoru + posun pásů	0.015
Kalibr. IMU senzoru + rotace pásů	0.015
Kalibr. IMU senzoru + rotace a posun pásů	0.015

Tabulka 5.2: Kolmé pásy – kalibrace

Při neprovedení výpočtu kalibračních jednotek je celková směrodatná odchylka 0,024 m. Pokud nezapočítáme vliv kalibrace IMU senzoru, je zde patrný vliv především posunu pásů, a to skoro o 0,002 metru oproti pouhé rotaci. Při započtení kalibrační jednotky laseru (IMU senzoru) je vliv posunu nebo i rotace minimální. Směrodatná odchylka je stejná jak v případě použití kalibrace IMU/GNSS, tak v případě pouze nastavení kalibrace výrobcem při kalibraci IMU jednotky. Při kalibraci a zvolení všech kalibračních jednotek jsou redukce následující:

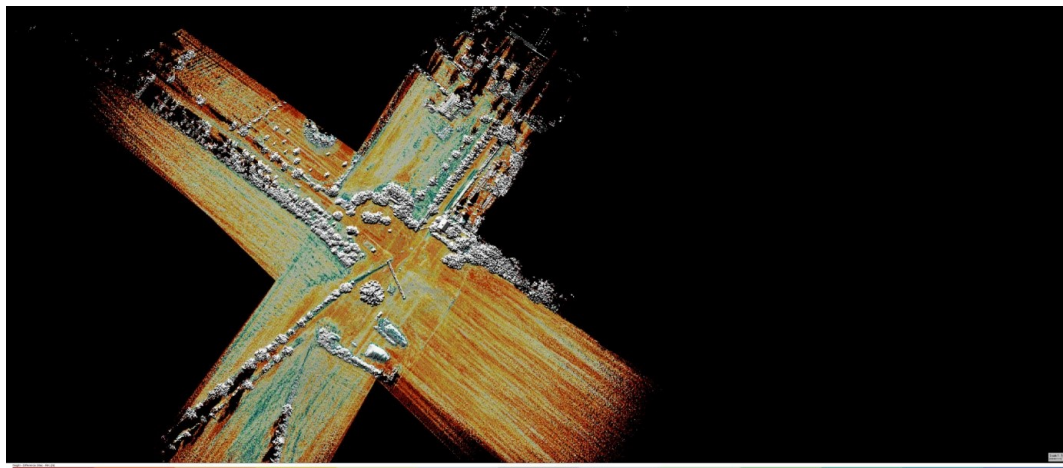
Název pásu	ω [°]	ϕ [°]	κ [°]	x [m]	y [m]	z [m]
_123252	-0.003	0.112	-0.279	-0.029	-0.139	-0.016
_124310	-0.055	-0.130	-0.012	0.015	-0.055	0.000

Tabulka 5.3: Kolmé pásy – kalibrace – redukce pásů

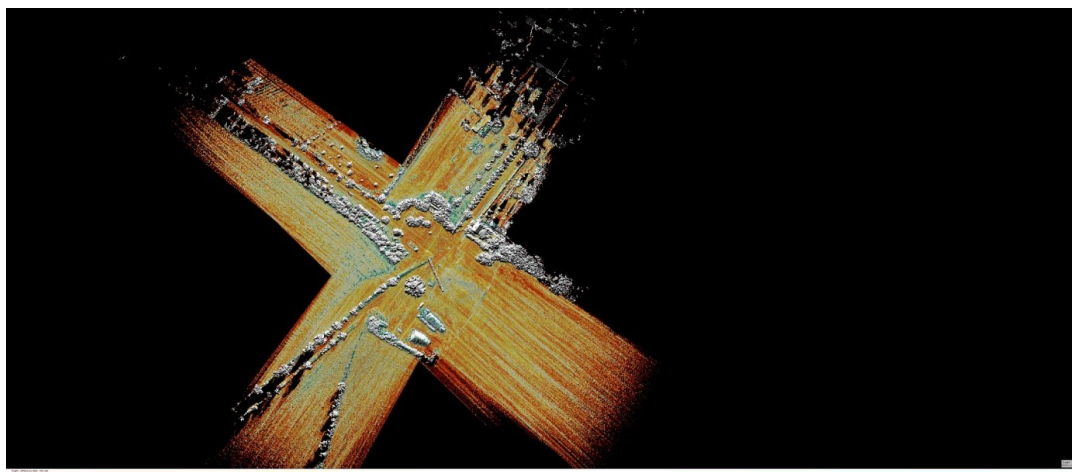
Nastavení laseru	ω [°]	ϕ [°]	κ [°]	x [m]	y [m]	z [m]
IMU UAV	0.19863	-0.18158	0.49545	0.193	-0.001	-0.004

Tabulka 5.4: Kolmé pásy – kalibrace IMU

Při porovnání pouze kalibračních jednotek IMU a jednotlivých pásů (IMU/GNSS jednotka) vidíme, že jednotky kalibrace IMU senzoru jsou mnohem větší než dopočítané jednotky jednotlivých pásů. Na následujících obrázcích jsou rezidua bodů těchto dvou pásů.



Obrázek 5.1: Kolmé pásy – žádné kalibrační jednotky



Obrázek 5.2: Kolmé pásy – rotace a posun pásů



Obrázek 5.3: Kolmé pásy – kalibrace IMU jednotky a rotace a posun pásů

Rozdíly mezi bodovým mračnem, ve kterém nejsou použity žádné kalibrační jednotky, a bodovým mračnem, ve kterém jsou použity alespoň kalibrační jednotky pásů nebo kalibračních jednotek naskenovaných pásů a IMU jednotky, je patrný ve vizualizaci na první pohled, především pak v dolní a horní části obrázku, kdy převažuje zelená barva. Při neprovedení kalibrace se v pásu, který je orientovaný od dolní části nahoru, zmenšili rezidua. Při rozdílu výšek dvou mračen do 0,05 metru jsou rezidua v červené barvě. Pokud do 0,1 metru jsou rezidua označeny zelenou barvou. Šedá barva označuje rozdíl do 0,3 metru a bílá barva pak rozdíl větší než 0,3 metru.

Rozdíl mezi kalibrací IMU/GNSS a kalibrací IMU a IMU/GNSS nejsou již patrná. Rezidua jsou počítána oproti průměru všech bodových mračen.

5.3 Příčné pásy (Kom. 2)

Tyto kalibrace byly vypočteny pro „kom. 2“.

Zvolené kalibrační jednotky	Směrodatná odchylka [m]
Žádné kalibrační jednotky	0.027
Jen posun pásů	0.016
Jen rotace pásů	0.020
Rotace a posun pásů	0.016
Kalibr. IMU senzoru	0.016
Kalibr. IMU senzoru + posun pásů	0.016
Kalibr. IMU senzoru + rotace pásů	0.016
Kalibr. IMU senzoru + rotace a posun pásů	0.015

Tabulka 5.5: Příčné pásy – kalibrace

Na rozdíl od výpočtu směrodatných odchylek kolmých pásů je zde výraznější vliv posunu oproti rotaci. Rozdíl činí 0,004 metry. A naopak při připočtení kalibrace jednotky laseru jsou zde jen minimální rozdíly. Přesto výsledná směrodatná odchylka kalibrace IMU jednotky i rotace a posunu pásu je menší, ale pouze o méně než 1 centimetr. Výsledné kalibrační jednotky jsou následující:

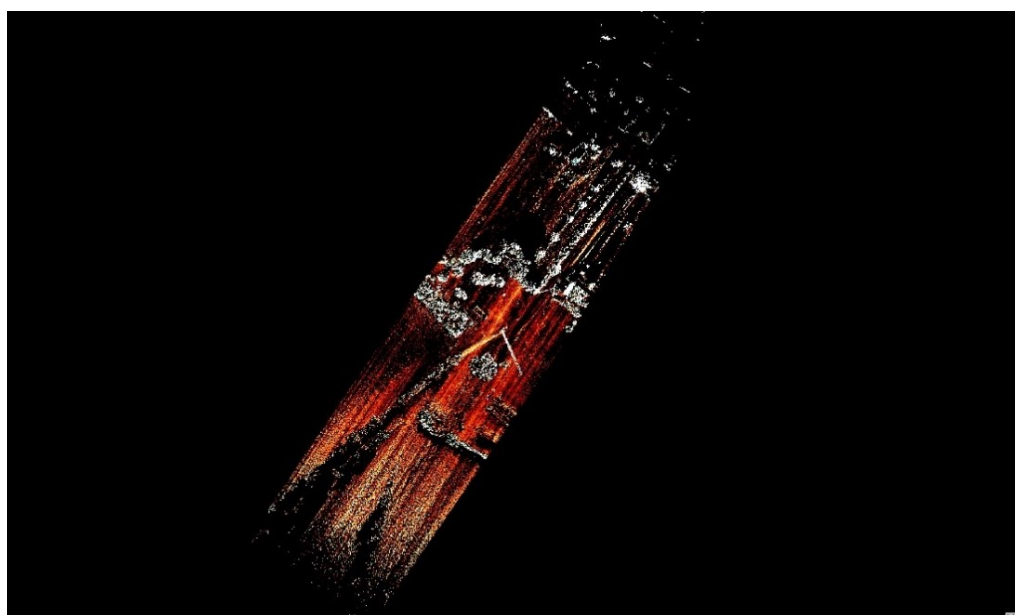
Název pásu	ω [°]	φ [°]	κ [°]	x [m]	y [m]	z [m]
_124310	-0.012	0.179	-0.269	-0.033	-0.160	-0.013
_123531	-0.064	-0.196	-0.011	0.040	-0.025	0.003

Tabulka 5.6: Příčné pásy – kalibrace – redukce pásů

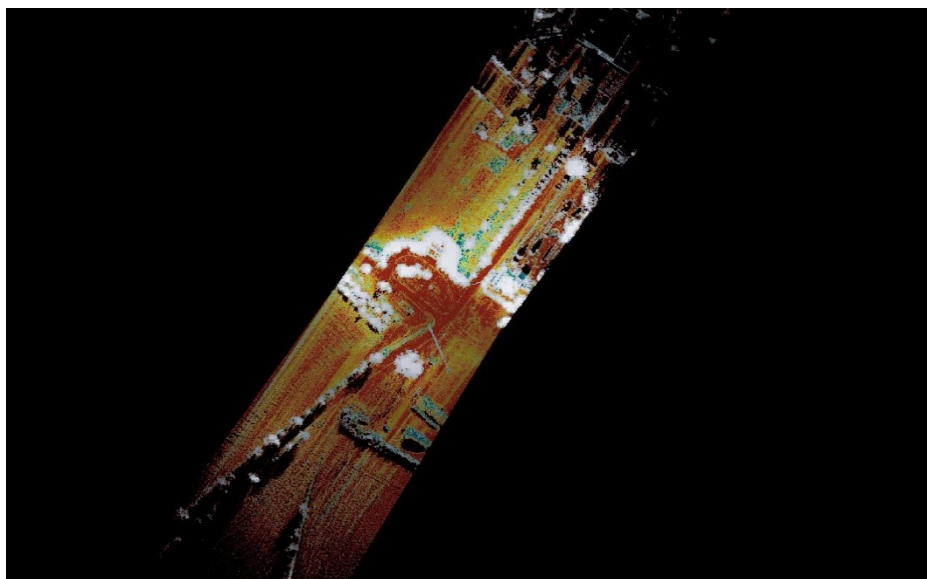
Nastavení laseru	ω [°]	φ [°]	κ [°]	x [m]	y [m]	z [m]
IMU UAV	0.19470	-0.15002	0.39655	0.165	0.000	-0.004

Tabulka 5.7: Příčné pásy – kalibrace IMU

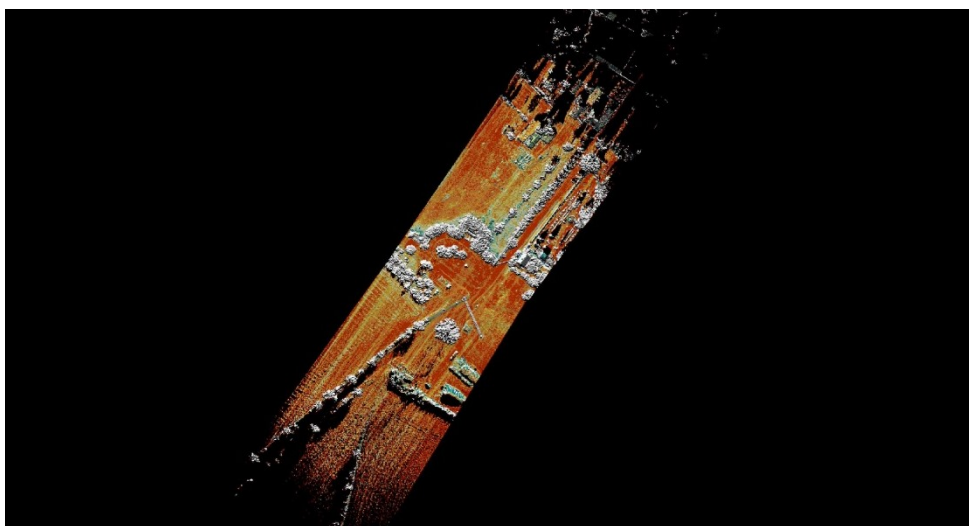
Zde na rozdíl od kolmých pásů (kom. 1) je nejvýraznější posun v jednom z pásů v ose y o 0,16 metru. Následně můžeme vizualizovat rozdíly těchto dvou pásů:



Obrázek 5.4: Příčné pásy – žádné kalibrační jednotky



Obrázek 5.5: Příčné pásky – rotace a posun pásů



Obrázek 5.6: Příčné pásky – kalibrace IMU jednotky, rotace a posun pásů

Bez použití kalibrace se v rozdílech dvou bodových mračen vyskytují slepá místa. To znamená, že rozdíl mezi případnými body je větší než 0,3 metru. Zde je taktéž patrné především lepší slícování naskenovaných mračen při použití jakékoliv kalibrace senzoru. A to jak IMU jednotky, tak jednotky IMU/GNSS.

5.4 Všechny pásky

Pro objektivní posouzení je třeba ještě zmínit kalibrace všech pásů. Pro výpočet bylo použito všech deseti pásů.

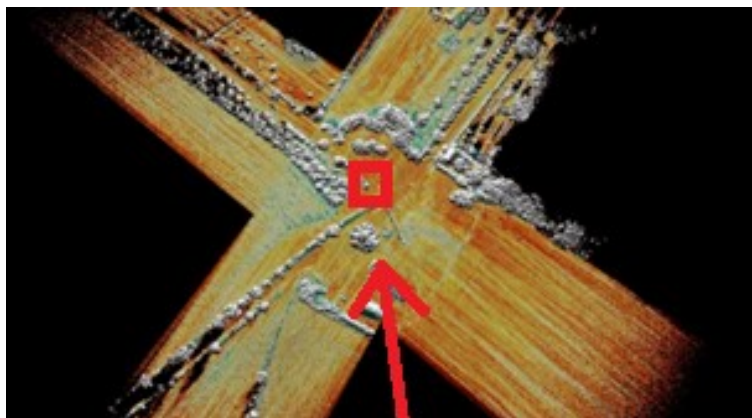
Zvolené kalibrační jednotky	Směrodatná odchylka [m].
Žádné kalibrační jednotky	0.021
Jen posun pásů	0.020
Jen rotace pásů	0.020
Rotace a posun pásů	0.017
Kalibr. IMU senzoru	0.017
Kalibr. IMU senzoru + posun pásů	0.018
Kalibr. IMU senzoru + rotace pásů	0.018
Kalibr. IMU senzoru + rotace a posun pásů	0.020

Tabulka 5.8: Všechny pásy – kalibrace

Při zvolení více naskenovaných pásů lze vidět, že se celková směrodatná odchylka snížila, a to v případě výpočtu kalibrační jednotky laseru a kalibračních jednotek pásů na rozdíl od kombinace 1 o 0,005 metru a na rozdíl od kombinace 2 o 0,005 metru. Přesto můžeme říci, že jakoukoli kalibrací se celková přesnost zvýšila. Směrodatná odchylka kalibrace IMU daná výrobcem je stejná, jako směrodatná odchylka IMU/GNSS daná rotací a posunem pásů, a to 0,017 metru.

5.5 Validace výsledků

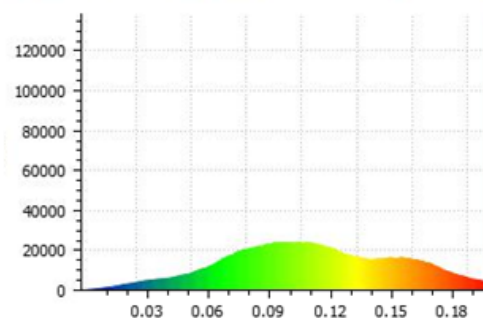
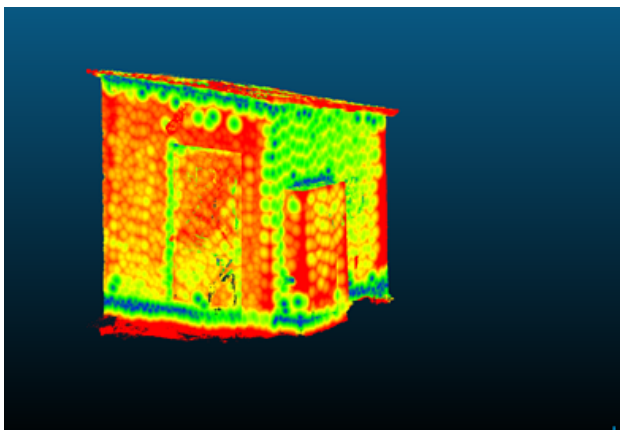
Jak jsem výše zmínil, validaci výsledků provedu několika způsoby. Především pak na objektu trafostanice, kontrolních bodech a na střeše naskenované stavby v blízkosti hlavní skenovací oblasti. Na objektu byla porovnávána jižní a východní stěna, především z toho důvodu, že se na jižní straně nacházel vstup a na východní straně kaplička.



Obrázek 5.7: Umístění objektu v bodovém mračnu

5.5.1 Fotogrammetrie

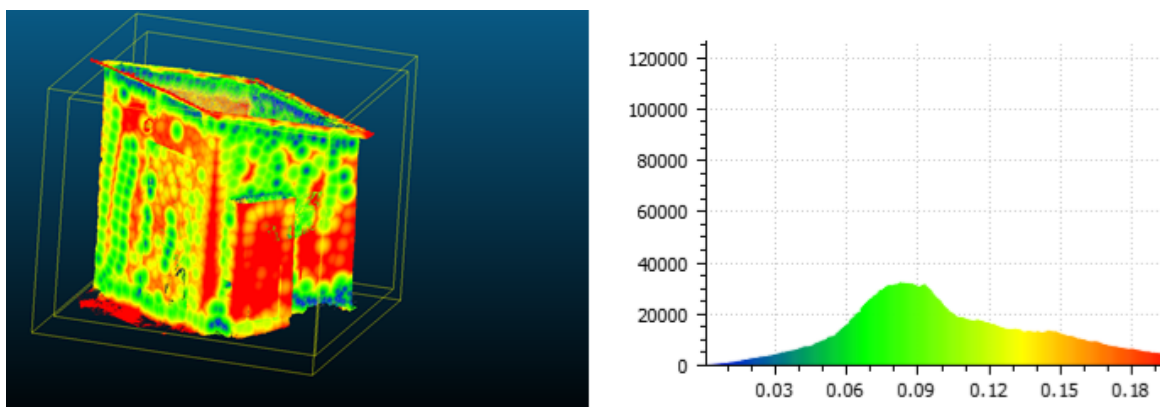
Jako první bylo provedeno porovnání nezkalibrovaného bodového mračka UAV s modelem vytvořeným fotogrammetrií. Pro porovnání mezi bodovým mračnem z UAV a bodovým mračnem z fotogrammetrie jsem vybral kom. 1 – kolmé pásy. Histogram nacházející se vpravo ukazuje na ose x rezidua bodů a osa y počet bodů. Porovnání proběhlo v místním souřadnicovém systému, kdy pro slícování porovnávaných bodových mračen byla použita shodnostní transformace.



Obrázek 5.8: Rezidua na trafostanici – nezkalibrované UAV a fotogrammetrie

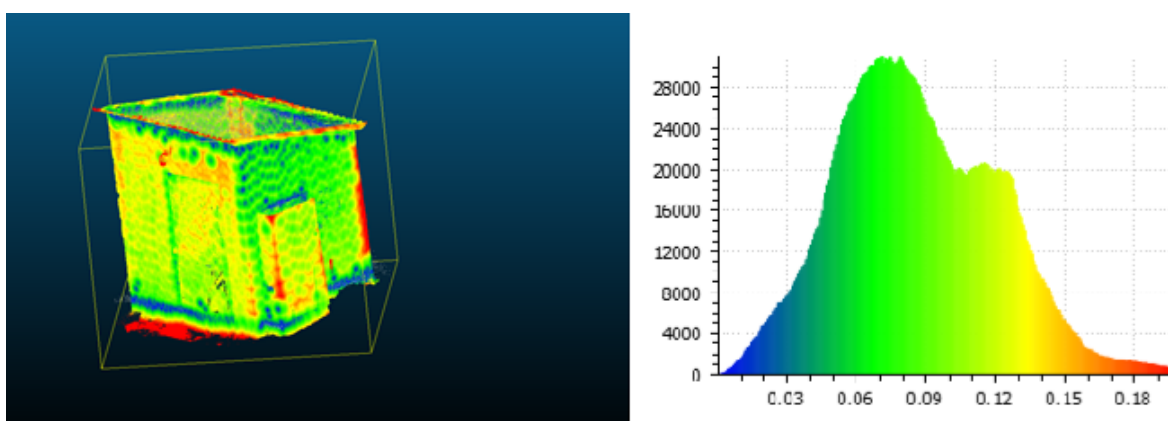
Prvním porovnáním bylo porovnání nekalibrovaného bodového mračka a modelu vytvořeného z fotogrammetrie. To bylo zvoleno jako referenční; výsledkem jsou větší rezidua jižní straně, kde se nacházejí dveře. Dále byly zjištěny velké rozdíly i u kapličky na boku objektu. Rezidua jsou až 0,2 metru. Přesto se největší počet naskenovaných bodů nachází průměrně 0,1 metru od modelu fotogrammetrie.

Následně proběhl výpočet reziduí pro kalibraci, která zohlednila jen rotaci.



Obrázek 5.9: Rezidua na trafostanici – kalibrační jednotka – jen rotace a fotogrammetrie

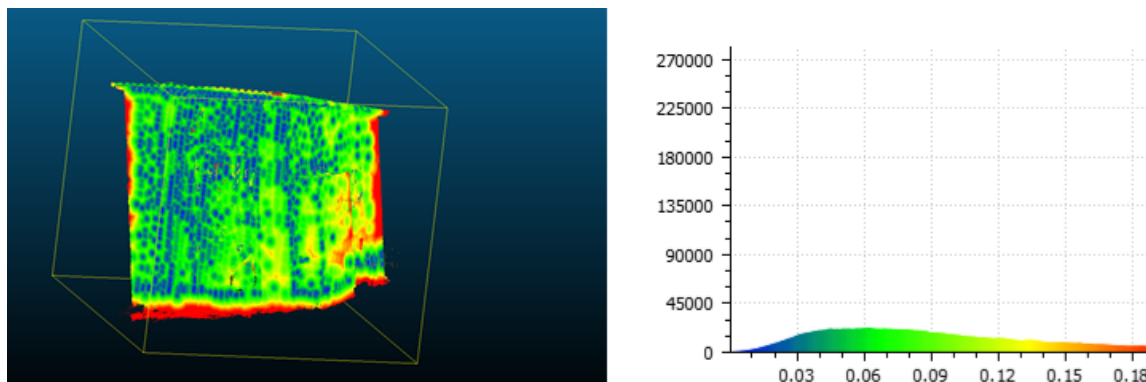
Z histogramu lze vyvodit, že se přesnost zvýšila (nejvíce bodů se nacházelo průměrně asi 0,08 metru od modelu), přesto jsou zde patrné velké rozdíly, a to především na východní stěně.



Obrázek 5.10: Rezidua na trafostanici – kalibrační jednotka – jen posun a fotogrammetrie

Při porovnání kalibračních jednotek posunu pásů a fotogrammetrie se opticky velmi zvýšila přesnost reziduí těchto dvou mračen. Odchytky okolo 0,2 metru se nacházejí především na hranách objektu. Co se týká východní a jižní stěny, zvýšila se přesnost, kromě výše zmíněných rohů, markantně. Překvapivě dobře je naskenován z UAV stavební otvor u

kovových dveří na jižní straně objektu. Z histogramu lze vyvodit, že nejčastější odchylkou dvou mračen je hodnota okolo 0,07 metru. Oproti rotaci se tedy zvýšila přesnost o 0,01 metru.



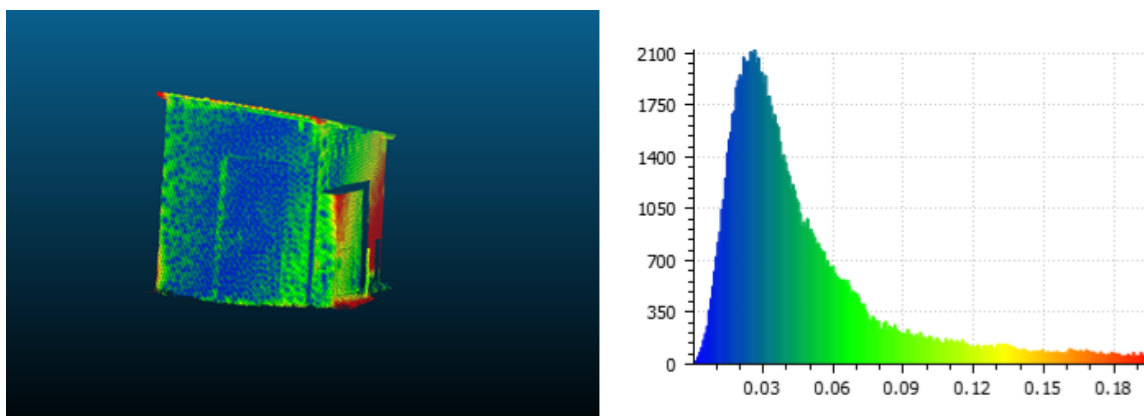
Obrázek 5.11: Rezidua na trafostanici – kalib. jednotka laseru + posun + rotace a fotogrammetrie

Posledním porovnáním bylo porovnání celkové kalibrace (tj. kalibrace jednotky laseru, posunu a rotace) a bodového mračna fotogrammetrie. Výsledek se na rozdíl od nekalibrovaného mračna velmi zlepšil. Nejčastější odchylky se nacházejí v intervalu 0,05 metru až 0,07 metru, přičemž u nekalibrovaného mračna je rozdíl těchto četností o 0,05 metru menší. Především jižní strana se zdá být velmi dobře naskenována. U východní strany objektu jsou rezidua zejména u rohu budovy.

5.5.2 Scan z totální stanice

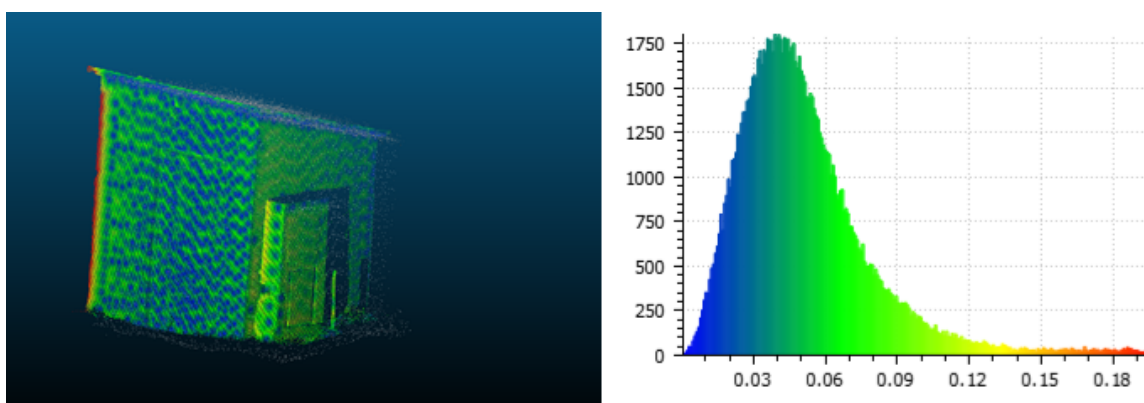
Pro porovnání bodových mračen z UAV a totální stanice byly zvoleny dvě kombinace validací. První je porovnání bodového mračna UAV kalibrovaného v jednotce laseru, posunu a rotace z kombinace 1 (tj. kolmé pásy) a mračna z multistanice. Druhou zvolenou kombinací je porovnání bodového mračna UAV kalibrovaného v jednotce laseru, posunu a rotace z kombinace 2 (tj. dva příčné pásy) a bodového mračna z totální stanice, respektive multistanice. Při skenování multistanicí byl zvolen krok skenování po 0,1 mgon v horizontálním i zenitovém úhlu. Proto je výsledné bodové mračno husté méně než bodové mračno z průřezové fotogrammetrie, což lze vypožorovat z výsledných histogramů.

Z této validace lze vyvodit, která kombinace je vhodnější, zda lze kolmými směry průběhu letu s kalibrovanými pásy zpřesnit výsledné naskenované objekty.



Obrázek 5.12: Rezidua na trafostanici – kalib. jednotka laseru + posun + rotace (pro kolmé pásy) a multistanice

Výsledná rezidua výše zmíněné kombinace 1 (tj. kolmých pásů) a bodového mračka z multistanice se vyznačují velmi dobrou přesností slícování, a to především na jižní straně objektu. Horší jsou výsledky na východní straně – konkrétně se jedná především o rohy kapličky i objektu, a na severní straně; činí okolo 0,18 metru rozdílu mračen. Přesto podle výsledného histogramu lze vidět, že nejčastějším rozdílem reziduí je hodnota 0,03 metru.

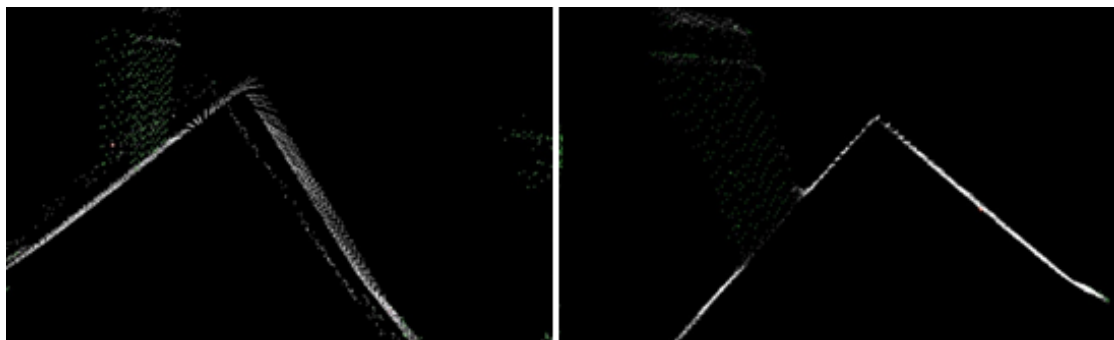


Obrázek 5.13: Rezidua na trafostanici – kalib. jednotka laseru + posun + rotace (pro příčné pásy) a multistanice

Rezidua bodových mračen kombinace 2 (tj. příčné pásy) a multistanice vypadají opticky lépe než kombinace 1. Důvodem je zejména nízká četnost velkých rozdílů. Přesto je nejčastější hodnotou rozdíl 0,04 metru, což je o 0,01 metru více než v předchozí kombinaci.

5.5.3 Řez plochou

Další kontrolou, spíše praktickou, je řez plochou nebo objektem. Tento způsob používá většina autorů. V naskenovaném mračnu jsme zvolili střechu stavebního objektu. Zde ovšem vznikl technický problém, protože se střecha nacházela na okraji trajektorie dráhy letu, a žádný směr letu ji tak neměl v přímém nadíru.



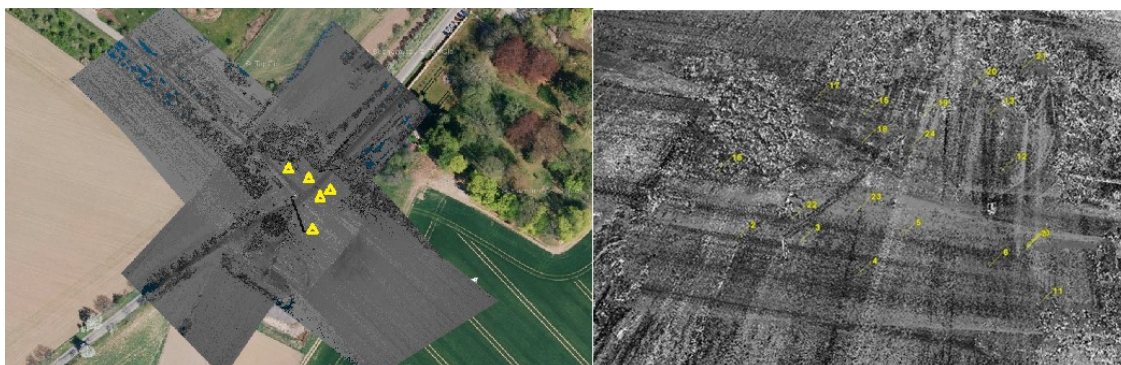
Obrázek 5.14: příčný řez – vlevo – před kalibrací; vpravo – po kalibraci IMU/GNSS (posun a rotace)

Přesto lze na příčném řezu naskenované střechy objektu pozorovat, že naskenovaná mračna bodů z jednotlivých pásů se po celkové kalibraci sice vyrovnala na jednu plochu, ale problém pozorují menší slícování u komína stavebního objektu. V tomto případě jsme využili pouze tři naskenované pásy z kombinací 1 a 2.

5.5.4 Rezidua na kontrolních bodech

Další kontrolou provedené kalibrace senzoru UAV je metoda, založená na měření kontrolních bodů. V měřené oblasti bylo zaměřeno 22 bodů při měření UAV. Tyto body jsou známy v souřadnicích bodového mračna i ve skutečnosti z měření GNSS. Je možné je také použít pro registraci bodového mračna.

Pro účely této práce byly vybrány pouze body, které byly jednoznačně určitelné z vizualizace bodového mračna. Jedná se zejména o body, které byly terče (viz předchozí kapitoly). Přesto by pro přesnější výsledky bylo vhodné zkontrolovat více bodů.



Obrázek 5.15: vlevo – použité kontrolní body v bodovém mračnu, vpravo - 3DReshaper a umístění všech měřených bodů v bodovém mračnu

Nyní je možné vypočítat rezidua na jednotlivých bodech. Pro účel kontroly bylo vybráno pět jednoznačných bodů. Body na terčích byly určovány z průniku dvou úseček, které byly nataženy v programu Infinity přes úhlopříčku terčů. Body 7-10 se nacházely na zaměřeném patníku a to vždy v rohu patníku. Kontrolní body na terčích a patníku byly vybrány z důvodu větší odrazivosti laserového paprsku a jejich dobré viditelnosti v bodovém mračnu. Pokud by laserový skener obsahoval CCD, bylo by možné pro porovnání vybrat větší počet kontrolních bodů (a tím i bodů k registraci bodového mračna).

Číslo bodu	Rezidua [m]
3	0.048
7	0.043
9	0.081
12	0.055
13	0.048

Tabulka 5.9: Odchyly vzdáleností nezpracovaného bodového mračna a GNSS měření

Největší rozdíl byl naměřen v rámci reziduí nekalibrovaného bodového mračna ze všech pásů a GNSS měření na bodě 9, a to 0,081 metru. Naopak nejmenší odchylka byla zaznamenána na bodě 7, a to 0,043 metru. Zvolená rezidua jsou s přesností na milimetry.

Číslo bodu	Rezidua [m]
3	0.044
7	0.030
9	0.071
12	0.028
13	0.031

Tabulka 5.10: Odchyly vzdáleností nekalibrovaných kolmých naskenovaných pásů a GNSS měření

Následně byly vyhodnoceny odchyly vzdáleností nekalibrovaných kolmých naskenovaných pásů (kom. 1) a GNSS měření, kdy největší odchylku vykazoval bod 9 a nejmenší bod 12, a to 0,028 metru.

Číslo bodu	Rezidua [m]
3	0.032
7	0.026
9	0.048
12	0.012
13	0.016

Tabulka 5.11: Odchyly vzdáleností kalibrovaných kolmých naskenovaných pásů a GNSS měření

Při odchylce vzdáleností bodů vytvořených kalibrací kolmých pásů (kom. 1) a GNSS měření byla největší odchylka na bodě 9, a to 0,048 metru. Naopak největší shoda vzdáleností byla zaznamenána na bodě 12, a to 0,012 metru. Pro příčné pásy byla největší vzdálenost vždy zjištěna na bodě 9, naopak nejmenší na bodě 12. Změna vzdáleností byla kalibrací snížena na nejlepším bodě o 0,016 metru.

Číslo bodu	Rezidua [m]
3	0.042
7	0.034
9	0.096
12	0.062
13	0.059

Tabulka 5.12: Odchyly vzdáleností nekalibrovaných příčných naskenovaných pásů a GNSS měření

Při určování odchylky vzdáleností nekalibrovaného bodového mračna tvořeného z příčných pásů (kom. 2) a GNSS měření byl největší rozdíl na bodě 9, a to 0,096 metru. Naopak nejmenší odchylku měl bod 7, a to 0,034 metru.

Číslo bodu	Rezidua [m]
3	0.032
7	0.039
9	0.075
12	0.030
13	0.059

Tabulka 5.13 : Odchylky vzdáleností kalibrovaných příčných naskenovaných pásů a GNSS měření.

Po kalibraci příčných pásů vykazoval nejmenší odchylku bod 12, a to 0,030 metru, naopak největší odchylku vykazoval bod 9, a to 0,075 metru. Rozdíl například na bodě 12 u kalibrovaného a nekalibrovaného bodového mračna příčných pásů je 0,032 metru. Přesto například pro bod 7 se kalibrací zvětšila odchylka vzdáleností, a to o 0,005 metru.

V příloze práce se nacházejí odchylky bodového mračna od GNSS měření pro všechny použité kombinace. V této kapitole jsou uvedena pouze ta nejdůležitější použitá rezidua.

6. Diskuze

Zatímco články s tematikou ALS laserového skenování (Wehl a kol. 1999; Gandor a kol. 2015; Persad a kol. 2015; Moudry a kol. 2018) nebo terestrického laserové skenování (Bitelli a kol. 2004; Lichti 2004; Pukanska a kol. 2014; Abellan a kol. 2015; Pirasteh a kol. 2016; Cai a kol. 2019; Ozdogan a kol. 2019) řeší spíše praktické využití těchto technologií, odborné články s UAV řešením (Clausen a kol. 2016; Akturk a kol. 2019 nebo Hyypä a kol. 2020) se zaměřují spíše na přesnosti této metody. Tímto se dostáváme k řešení kauzality, jež nám ozřejmí, že UAV laserové skenování je novou technologií. Paradoxně větší použitelnost a rozmach nastává v případě fotogrammetrie UAV (Pukanska a kol. 2014; Blistan a kol. 2016; Stocker a kol. 2017; Koska a kol. 2017; Grigillo a kol. 2018; Przybilla a kol. 2019), která se autorům zdá více uživatelsky přívětivá, a to především z důvodu automatizace procesů, nižší pořizovací ceny přístroje a též i menší velikosti UAV (kamera nemá vysokou hmotnost jako laserový skener). Velkou výhodou fotogrammetrie UAV je, že se přístroj může používat pouze jako kamera, například na pasportizace nebo jako prohlížečka stavebních objektů.

Je vhodné zmínit, že použití těchto všech metod v praktických případech závisí hlavně na přesnosti dané metody. Nejčastějším případem je monitoring extravilánu, především pak etapové měření (v časových řadách). Etapové měření se nejvíce užívá právě při monitoringu stability objektů, například svahů (Bitelli a kol. 2004; Monserrat a kol. 2008; Braun 2014; Blistan a kol. 2016; Eker a kol. 2017; Mayr a kol. 2018 nebo Pan 2018). V tomto lze spatřit, že právě pro monitoring geotechnických hazardů má potenciál UAV laserové skenování (Moon a kol. 2019). Dále se používá pro potřeby stavebnictví, o čemž se zmiňuje například Habib (2008) nebo i jiných odvětvích, zmíněných v úvodu této práce.

Při procesu měření (v případě geodézie, metrologie apod.) a sběru dat je potřeba provést analýzu všech vstupních potenciálních proměnných, se kterými se následně bude pracovat. Podle Skalouda (2006), Glennieho (2007) i Cucciho (2017) je nezbytné pro dosažení co nejpřesnějšího výsledku 3D modelu vytvořeného z UAV platformy provést řádný post-processing, a to především s raw daty. Bakule (2016), Yang (2018) nebo Trafina (2018) řeší danou problematiku především technicky. Zaměřují se na proces KF, který se snaží řešit technologicky. Problém spatřují v synchronizaci mezi IMU jednotkou, GNSS jednotkou, POS a laserovým skenerem. Tato problematika je tedy spíše technologického rázu a soustřeďuje se hlavně na jednotlivé hardwarové součásti UAV skeneru, především pak na programátorskou komunikaci mezi IMU/GNSS a POS.

Autoři Kornus (2003), Habib (2008), Skaloud (2014), Persad (2015) nebo například Eker (2017) řeší zpřesňování bodového mračna pomocí kalibrace senzoru. Kalibraci řeší několika způsoby, které jsou zřejmé z předchozích kapitol. Přesto, jak jsem již psal v úvodu, není technicky ani žádnou normou nastaveno, jaký postup je správný a je to stále předmětem zájmu a diskuzí. Jelikož se jedná o pokročilou úroveň zpracování UAV laserového skenování, mnoho firem proto využívá primárních nastavení softwaru, kde je pouze základní slícování a provedení pouze základní kalibrace IMU jednotky. Případně pak nevyužívá kalibraci vůbec. Výsledné bodové mračno pouze očistí a poté jej dále zpracovávají v CAD nebo jiném softwaru. Stejný problém je například s následnou filtrací bodového mračna pomocí klasifikace. Mnoho firem, především kvůli časové úspoře, bodové mračno pouze očistí analyticky v softwaru a dále nevyužívají možnost klasifikace (Hyypä a kol. 2020).

Co se týká kalibrace senzoru, v práci byly použity dvě vybrané metody kalibrace IMU/GNSS senzoru. První metodou bylo rozdělení bodového mračna na jednotlivé pásy podle směru trajektorie letu nehledě na koncepci letu. Tuto metodu používají například Habib (2008) nebo Wang (2010). Druhou metodou bylo rozdělení pásů na příčné pásy (rovnoběžně naskenované) a příčné pásy (dva na sebe kolmé pásy). Stejnou metodu využívá například Cucci (2017). Tato metoda je závislá vždy jen na způsobu provedení letu.

Analýza a výzkum byly rozděleny do tří dílčích kroků. V prvním kroku byly vybrány kolmé pásy (zde značené jako kom. 1), dále příčné pásy (kom. 2) a poté všechny naskenované pásy. Pásy z kombinace 1 a kombinace 2 byly vybrány z důvodu blízkého průletu kolem objektu trafostanice, na které byla poté prováděna validace dat. V každém jednotlivém kroku bylo zkoumáno sedm možností kalibrace. Výsledkem pak byla směrodatná odchylka. Mezi tyto možnosti byly zvoleny kalibrační jednotky s ohledem na výzkum. Jednotlivé kombinace nastavených parametrů byly: žádné kalibrační jednotky, jen posun pásů (x, y, z), jen rotace pásů (ω, φ, κ), rotace a posun pásů ($x, y, z, \omega, \varphi, \kappa$); vždy nastavené pro kalibraci senzoru IMU/GNSS. Poté byly provedeny kombinace s provedenou kalibrací IMU jednotky – posun pásů, rotace pásů a kalibrace IMU jednotky, posunu a rotace pásů charakterizující kalibraci komunikace IMU/GNSS jednotky. Mimo jiné parametry hledání slícování společných ploch byly nastaveny podle výrobce; zde se nabízí možnost provedení výzkumu, při kterém by byly nalezeny nejlepší parametry, a to je podle výsledku nastavení kalibrace.

Pro kolmé pásy se u všech kombinací zvolených kalibračních jednotek zvýšila přesnost. Pokud nebyly zvoleny žádné kalibrační jednotky, byla směrodatná odchylka 0,024 metru. Při

použití kalibračních jednotek IMU a vyrovnání pomocí pásů se zvýšila přesnost slícování na směrodatnou odchylku 0,015 metru, respektive na směrodatnou odchylku 0,017 metru za použití pouze kalibračních jednotek rotace pásů. U kolmých pásů se tedy nepotvrdilo počáteční tvrzení, že především posun u kalibrace IMU/GNSS nejvíce ovlivní výsledek kalibrace. Při skenování kolmých pásů je vhodné používat kalibraci IMU danou výrobcem, jelikož případné vyrovnání nezvyšuje výslednou přesnost, respektive ji zvyšuje pouze submilimetrově. Výsledná kalibrace v případě nastavení všech kalibračních jednotek ovšem potvrdila zvýšení přesnosti kontrolních bodů. Kornus (2003), Persad (2015) nebo Cucci (2017) potvrzují, že se zvýší přesnost kontrolních bodů v nadiru trajektorie dvou naskenovaných pásů. V našem případě se zvýšila přesnost na bodech 9, 12 a 13, a to o 23 milimetrů na bodě 9, o 16 milimetrů a o 15 milimetrů u bodů 12 a 13. Při reziduích skenu z totální stanice a při maximální kalibraci dvou kolmých pásů na stavebním objektu jsou nejčtenější odchylky ve vytvořeném histogramu 0,03 metru. Cucciho (2017) rozdíly na kolmých pásech jsou podobné, a to průměrně okolo 15 milimetrů na kontrolních bodech.

Po kalibraci dvou příčných pásů se snížila směrodatná odchylka z nekalibrovaného mračna bodů (0,027 metru) ve všech případech na 0,016 metru, respektive na 0,020 metru pouze u rotace pásů (pouze IMU/GNSS). Z výše zmíněného je patrné, že při provedení pouze rotace pásů sníží přesnost slícování bodového mračna. Je zřejmé, že kalibrace senzoru, která je vypočtena z IMU jednotky, je dostačující a vliv vyrovnání pásů zde není patrný. Při porovnání vzdáleností na kontrolních bodech na příčných pásech je největší reziduum patrné na bodě 9, a to přesně 0,010 metru. Přesto je zde poté rozdíl oproti GNSS měření 0,075 metru. Celkově je na porovnání vzdáleností mezi kalibrací dvou příčných pásů a GNSS měření patrný horší vliv slícování. Cucci (2017) zmiňuje, že v případě naskenování příčných pásů je vhodné každý jednotlivý pás registrovat na vlíčovací body. Tudíž pro vyšší výslednou přesnost je vhodné plán letu organizovat kolmými pásy. Z porovnání bodového mračna z multistanice a z kalibrovaného bodového mračna z příčných pásů je zřejmé zhoršení výsledků, kdy nejčtenější odchylka je 0,04 metru. Při porovnání směrodatných odchylek nekalibrovaných bodových mračen u kolmých a příčných naskenovaných pásů je zde rozdíl 0,003 metru. A při porovnání reziduí u obou kombinací (kolmých a příčných pásů), kdy se u kolmých pásů zvýšila přesnost o 16 milimetrů a u naskenovaných příčných pásů pouze o 10 milimetrů je zřejmé, s přihlédnutím k směrodatným odchylkám nekalibrovaných mračen, že při skenování na sebe kolmých pásů (kom. 1.) vykazuje lepší přesnost.

Z validace dat, kdy se porovnávají jednotlivé parametry kalibračních dat a model z fotogrammetrie, vyplývá, že dopočítaná kalibrace IMU senzoru je dostačující pro zlepšení přesnosti výsledného bodového mračka, nehledě na slícování a vyrovnání naskenovaných pásů (přesnost IMU/GNSS). U histogramu četností bodů na stavebním objektu lze spatřit, že se zvýšila přesnost přidání kalibrace IMU senzoru o 0,004 metry. Z porovnání výsledků kalibrace u všech naskenovaných pásů je zřejmé, že se směrodatná odchylka u neprovedení žádné kalibrace (0,021 metru) snížila pomocí kalibrace senzoru IMU jednotky na 0,018 metru, nehledě na posun nebo rotaci jednotlivých pásů. Persad (2015) zmiňuje, že pokud nastavil kalibraci IMU/GNSS senzoru, byl výsledek stejný jako v případě manuálního vyrovnání parametrů kalibrace IMU. Stejně tak při provedení příčného řezu lze spatřit, že se výsledné bodové mračno slícovalo do jedné plochy (stejně tak i u Habiba, 2008).

Součástí komentáře výsledků je hodnocení provedení výzkumu. Práce je zaměřena především na hodnocení vlivu IMU/GNSS jednotky na výslednou přesnost bodového mračka. Přesto v rámci nastavení kalibrace je zvolena metodika přístupu k měření. Proto jsou zvoleny různé kombinace naskenovaných pásů. V rámci validace, kdy jsou porovnávány odchylky měření GNSS a kalibrovaných bodových mraček bylo zvoleno hodnocení vhodnosti skenování UAV různými směry letu (křížové lety). Z tohoto důvodu byly v rámci práce vybrány kombinace příčných a podélných pásů. Proto lze nyní hodnotit vhodnost tohoto skenování. Výzkumem se potvrdilo, že pro vyšší přesnost výsledného bodového mračka je vhodné let koncipovat jako skenování kolmých a příčných směrů. V případě, že se provede kalibrace IMU jednotky podle doporučení výrobce, je možné dosáhnout lepších výsledků, než pokud se let provede pouze jedním směrem. Cucci (2017) upozorňuje, že neprovede-li se skenování více směry, je vhodné jednotlivé naskenované pásy registrovat na vlíčovací body. Validace výsledků hodnocení vhodnosti skenování UAV ve více směrech byla provedena na porovnání odchylek na stavebním objektu, kdy se porovnává referenční bodové mračno pořízené multistanicí a bodové mračno vytvořené vícero kombinacemi směrů letu.

Z provedených kalibrací, kdy je zohledněna kalibrace IMU jednotky a kalibrace pomocí vyrovnání jednotlivých naskenovaných pásů (IMU/GNSS), vyplývá, že kalibrační jednotky naskenovaných pásů, které se vyrovnají pomocí metody MNČ, neovlivňují výslednou přesnost. Přesnost je zde charakterizována jako směrodatná odchylka. Kalibrace jednotlivých parametrů byla provedena pro tři kombinace: pro příčný a podélný směr a poté pro všechny naskenované pásy, které byly změřeny v pěti podélných a pěti příčných pásech. Je ovšem zřejmé, že při provedení vyrovnání kalibrace IMU/GNSS senzoru, pomocí naskenovaných

pásů, je více patrný vliv posunu. Rehak (2017) (stejně tak Clausen (2016)) vliv posunu zmiňuje a dodává, že při kalibraci naskenovaných pásů právě více ovlivňuje posun. Taktéž ve své práci zmiňuje, že přesnost bodového mračna naskenovaného UAV ovlivňuje spíše kalibrace IMU. To znamená, že pro lepší hodnocení přesnosti naskenovaného mračna je lepší provést kontrolu na kontrolních a vlíčovacích bodech, než provedením kalibrace IMU/GNSS.

7. Závěr

Hlavním cílem této diplomové práce bylo zhodnocení provedení kalibrace IMU/GNSS UAV. Pro měření byl použit přístroj RIEGL miniVUX-1UAV. Záměrem bylo najít vliv jednotlivých kalibračních jednotek na kalibraci IMU a GNSS. Pro tento výzkum byl taktéž využit předpoklad, že směr trajektorie letu UAV má vliv na slícování bodových mračen pořízených v jednotlivých pásech. Měření probíhalo v lokalitě Horní Vidim, ve které byla naskenována experimentální oblast.

Výzkum byl rozdělen do několika částí. V první části byl porovnáván vliv slícování mračen pomocí kalibrace na různých směrech letu. Součástí výzkumu bylo určení závislosti jednotlivých kalibračních jednotek, včetně kalibrace senzoru IMU/GNSS. V druhé části výzkumu byla provedena podrobná analýza všech kalibračních parametrů, ve které byly všechny parametry z prvního výzkumu podrobeny kritickému zhodnocení, a to různými metodami. Mezi tyto metody patřilo porovnávání bodových mračen v závislosti na objektu nebo jednotlivém bodu. Validovány byly výsledky vlivu směru letu i kalibračních jednotek. Pro validaci bylo využito měření pomocí fotogrammetrie a měření pomocí geodetických přístrojů.

V rámci hodnocení metodiky směru letu se potvrdilo, že průběh letu UAV má vliv na výslednou přesnost a slícování bodového mračna. V různých směrech letu (tzv. křížovém letu) je výsledné bodové mračno více přesné a lépe slícované, nehledě na provedenou kalibraci. Proto s ohledem na výsledky doporučuji skenovat laserovým skenerem UAV křížovým letem. Na tento předpoklad je důležité brát zřetel především při tvoření plánu letu.

Z hlediska kalibračních jednotek IMU/GNSS se potvrdil větší vliv posunu (posun x , y , z). Přesto dle provedených testů a výzkumu se nepotvrdilo, že provedení kalibrace IMU/GNSS senzoru má výraznější vliv na výslednou přesnost bodového mračna. Proto není potřeba zavádět do kalibrací vliv IMU/GNSS jednotky a je možné použít pro výpočet a zpřesnění bodového mračna pouze kalibrační prvky dané výrobcem. Výsledný rozdíl v bodovém mračnu, které je kalibrováno podle výrobce, se pohybuje při zavedení vyrovnání pomocí kalibračních jednotek IMU/GNSS v řádu do 1 milimetru ve směrodatné odchylce.

Problematika laserového skenování UAV je velmi obsáhlá a nabízí nespočet možných druhů testů a výzkumů. Podle současné odborné literatury je však zatím spíše doplňkovou metodou k metodě fotogrammetrie z UAV. Laserové skenování UAV má velký potenciál v rámci zpracování měření z této metody k možnostem vytvoření dalších metod a výpočtů pro zpřesnění výsledného bodového mračna, potažmo k vytvoření velmi kvalitního 3D modelu. V příloze této práce přikládám odchylky bodového mračna od GNSS měření pro všechny použité kombinace.

Použitá literatura a zdroje práce

- ABELLAN, A., LATO, M., EDWARDS, T., JABOYEDOFF, M. (2015): A 4D Filtering and Calibration Technique for Small-Scale Point Cloud Change Detection with a Terrestrial Laser Scanner. *Remote Sensing*. 2015. roč. 7, č. 10, s. 13029–13052. ISSN 20724292.
- AKCA, D., GRUEN, A. (2006): Fast correspondence search for 3D surface matching. In *ISPRS Workshop Laser Scanning 2005: Enschede, the Netherlands, 12-14 September 2005* (s. 186–191). GITC.
- AKTURK, E., ALTUNEL, A. O. (2019): Accuracy assesment of a low-cost UAV derived digital elevation model (DEM) in a highly broken and vegetated terrain. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*. 2019. č. 136, s. 382–386. ISSN 02632241.
- BALTSAVIAS, E. P. (1999a): A comparison between photogrammetry and laser scanning. *ISPRS Journal of photogrammetry and Remote Sensing*, roč. 54, č. 2–3, s. 83–94.
- BALTSAVIAS, E. P. (1999b): Airborne laser scanning: basic relations and formulas. *ISPRS Journal of photogrammetry and remote sensing*, roč. 54, č. 2–3, s. 199–214.
- BAKULE, L., PAPIK, M., REHAK, B. (2016): Quantized event-triggered static output feedback stabilization. *2016 12th IEEE International Conference on Control and Automation (ICCA), Control and Automation (ICCA)*. 2016. s. 499–504. ISBN 9781509017386.
- BITELLI, G., DUBBINI, M., ZANUTTA, A. (2004): Terrestrial laser scanning and digital fotogrammetry techniques to monitor landslide bodies. *University of Bologna*. 2004.
- BLISTAN, P., KOVANCIC, L., ZELIZNAKOVA, V., PALKOVA, J. (2016): Using UAV photogrammetry to document rock outcrops. *Acta Montanistica Slovaca*. 2016. roč. 21, č. 2, s. 154–161. ISSN 1335-1788.
- BRAUN, J. (2014): Geodetic monitoring methods of landslide-prone regions - application to Rabenov. *Acta Universitatis Carolinae. Geographica*, 2014.
- CAI, Z., CHIN, T., BUSTOS, A. P., SCHINDLER, K. (2019): Practical optimal registration of terrestrial LiDAR scan pairs. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* . 2019. č. 147, s. 118–131. ISSN 09242716.
- CLAUSEN, P., REHAK, M., SKALOUD J. (2016): UAV Sensor Orientation with Pre-calibrated Redundant IMU/GNSS Observations: Preliminary Results. *DGPF. Bern, Schweiz: DGPF*, 2016. č. 25. ISSN 2512-2819.
- CUCCI, D. A., REHAK, M., SKALOUD, J. (2017): Bundle adjustment with raw inertial observations in UAV applications. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 2017. č. 130, s. 1–12. ISSN 09242716.

- EKER, R., AYDIN, A., HUBL J. (2017): Unmanned aerial vehicle (UAV)-based monitoring of a landslide: Gallenzerkogel landslide (Ybbs-Lower Austria) case study. *Environmental Monitoring And Assessment*. 2017. roč. 190, č. 1, s. 28. ISSN 15732959.
- ELSNER, P., DORNBUSCH, U., THOMAS, I., AMOS, D., BOVINGTON J., HORN, D. (2018): Coincident beach surveys using UAS, vehicle mounted and airborne laser scanner: Point cloud inter-comparison and effects of surface type heterogeneity on elevation accuracies. *Remote Sensing of Environment*. 2018. roč. 208, s. 15–26. ISSN 00344257.
- GANDOR, F., REHAK, M., SKALOUD, J. (2015): Photogrammetric milion planner for RPAS. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. 2015. roč. XL-1-W4, s. 61–65. ISSN 16821750.
- GLENNIE, C. (2007): Rigorous 3D error analysis of kinematic scanning LIDAR systems. *Journal of Applied Geodesy*, roč. 1, č. 3, s. 147.
- GRESSIN, A., MALLET, C., DAVID, N. (2012): Improving 3D LiDAR point cloud registration using optimal neighborhood knowledge. *ISPRS*. 2012. roč. I-3, s. 111–116.
- GRIGILLO, D., AMBROZIC, T., PAVLOVCIC-PRESEREN, P., KOSMATIN-FRAS, M., URSIC, M., BONE, M. (2018): Analysis of the impact of interior orientation parameters in different uav-based image-block compositions on positional accuracy. *Metrology and Measurement Systems*. 2018. roč. 25, č. 3, s. 617–629. ISSN 23001941.
- GRUEN, A., AKCA, D. (2005): Least squares 3D surface and curve matching. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, roč. 59, č. 3, s. 151–174.
- HABIB, A. F., a kol. (2008): LiDAR strip adjustment using conjugate linear features in overlapping strips. *Proceedings of International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2008. s. 385–390.
- HAMPACHER, M., RADOUCH, V. (1997): Teorie chyb a vyrovnávací počet 10. Skripta, Vydavatelství ČVUT, Praha, 159 stran.
- HYYPÄ, E., HYYPÄ, J., HAKALA, T., a kol. (2020): Under-canopy UAV laser scanning for accurate forest field measurements. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 2020. roč. 164, s. 41–60. ISSN 09242716.
- JÁŠEK, P. (2018): *Zvyšování přesnosti dat 3D skenování pro geodetický monitoring*. Disertační práce. České vysoké učení technické v Praze, Stavební fakulta. 2018.
- JEŽEK, J. (2015): *Geostatistika a prostorová interpolace*. Univerzita Karlova v Praze, Přírodovědecká fakulta. Nakladatelství Karolinum. 2015. ISBN 978-80-246-3076-2.
- KOSKA, B., JIRKA, V., URBAN, R., KŘEMEN, T., HESSLEROVÁ, P., JON, J., POSPÍŠIL, J., FOGL, M. (2017): Suitability, characteristics, and comparison of an airship UAV with lidar for middle size area mapping, *International Journal of Remote Sensing*. 2017. roč. 38, č. 8–10, s. 2973–2990. ISSN 0143-1161.

KRSAK B., BLISTAN, P., PAULIKOVA, A., PUSKAROVA, P., KOVANIC, L. ml., PALKOVA, J., ZELIZNAKOVA, V. (2016): Use of low-cost UAV photogrammetry to analyze the accuracy of a digital elevation model in a case study. *Measurement*. roč. 91, s. 276–287. ISSN 0263-2241.

LICHTI, D. (2004): A resolution measure for terrestrial laser scanners, Department of Spatial Sciences, Curtin University of Technology Perth, 2004.

MAYR, A., RUTZINGER, M., GEITNER, C. (2018): Multitemporal analysis of objects in 3D point clouds for landslide monitoring. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. 2018. roč. XLII-2, s. 691–697. ISSN 16821750.

MONSERRAT, O., CROSETTO, M. (2008): Deformation measurement using terrestrial laser scanning data and least squares 3D surface matching. *ISPRS Journal of photogrammetry and remote sensing*. 2008, roč. 63, č. 1, s. 142–154. ISSN 09242716.

MOON, D., CHUNG, S., KWON, S., SEO, J., SHIN, J. (2019): Comparison and utilization of point cloud generated from photogrammetry and laser scanning: 3D world model for smart heavy equipment planning. *Automation in construction*. 2019. roč. 98, s. 322–331. ISSN 09265805.

MOUDRY, V., URBAN, R., STRONER, M., KOMAREK, J., BROUCEK, J., PROSEK, J. (2018): Comparison of a commercial and home-assembled fixed-wing UAV for terrain mapping of a post-mining site under leaf-off conditions. *International Journal of Remote Sensing*. 2018. s. 1–18.

NOVÁK, Z., PROCHÁZKA, J. (1998): Inženýrská geodézie 10. České vysoké učení v Praze. 1998.

OZDOGAN, M. V., DELIORMANLI, A. H. (2019): Landslide detection and characterization using terrestrial 3D laser scanning (LiDAR). *Acta Geodynamica et Geomaterialia*. 2019. roč. 16, č. 4, s. 379–392. ISSN 12149705.

PAN, Y. (2018): Landslide Monitoring based on Terrestrial Laser Scanning. *A Novel Semi-automatic Workflow*. 2018.

PAVELKA, K. (2009): *Fotogrammetrie 1*. České vysoké učení technické v Praze. 2009. ISBN 978-80-01-04249-6.

PERSAD, R. A., ARMENAKIS, C. (2015): Alignment of point cloud DSMs from TLS and UAV platforms. *The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. 2015. roč. 40, č. 1, s. 369.

PIRASTEH, S., LI, J. (2016): Landslides investigations from geoinformatics perspective: quality, challenges, and recommendations. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*. 2016. roč. 8, č. 2, s. 448–465. ISSN 1947-5705.

PRZYBILLA, H.-J., LINDSTAEDT, M., a KERSTEN, T. (2019): Investigations into the quality of image-based point clouds from UAV imagery. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing*. 2019. roč. XLII-2, č. W13, s. 539–545. ISSN 16821750.

- PUKANSKA, K., BARTOS, K., SABOVA, J. (2014): Comparison of Survey Results of the Surface Quarry Spišské Tomášovce by the Use of Photogrammetry and Terrestrial Laser Scanning. *Inžynieria Mineralna*. roč. 33, č. 1, s. 47–54. ISSN 1640-4920.
- REHAK, M., MABILLARD, R., SKALOUD, J. (2013): A micro-UAV with the capability of direct georeferencing. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. 2013. roč. XL-1, č. W2, s. 317–323. ISSN 16821750.
- REHAK, M., SKALOUD, J. (2015): Fixed-wing micro aerial vehicle for accurate corridor mapping. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. 2015. roč. II-1, č. W1, s. 23–31. ISSN 21949042.
- REHAK, M., SKALOUD, J. (2017): Performance assessment of integrated sensor orientation with a low-cost GNSS receiver. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. 2017. roč. IV-2, č. W3, s. 75–80. ISSN 21949042.
- RUEGER, J. M. (1990): Electronic distance measurement: an introduction. 3rd totally rev. ed. New York: Springer-Verlag. ISBN 03-875-1523-2.
- SKALOUD, J., LICHTI, D. (2006): Rigorous approach to bore-sight self-calibration in airborne laser scanning. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 2006. roč. 61, č. 1, s. 47–59. ISSN 09242716.
- SKALOUD, J., LEGAT, K. (2008): Theory and reality of direct georeferencing in national coordinates. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 2008. roč. 63, č. 2, s. 272–282. ISSN 09242716.
- SKALOUD, J., REHAK, M., LICHTI, D. (2014): Mapping with MAV: Experimental Study on the Contribution of Absolute and Relative Aerial Position Control. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. 2014. roč. XL-3, č. W1, s. 123–129. ISSN 16821750.
- STOCKER, C., NEX, F., KOEVA, M., GERKE, M. (2017): Quality assessment of combined IMU/GNSS data for direct georeferencing in the context of UAV-based mapping. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, č. 42, s. 355.
- ŠTRONER, M., POSPÍŠIL, J. (2008): Terestrické skenovací systémy. Praha: ČVUT v Praze. 185 stran. ISBN 978-80-01-04141-3.
- ŠTRONER, M., POSPÍŠIL, J., KOSKA, B., KŘEMEN, T., URBAN, R., SMÍTKA, V., TRÁSÁK, P. (2013): 3D skenovací systémy Praha: ČVUT v Praze. ISBN 978-80-01-05371-3.
- TRAFINA, T. (2018): *Application of Kalmans filter to improve the localization of multi-rotor UAVs*. Diploma thesis. Czech technical university in Prague. 2018.
- TU, Z., FEI, F., EAGON, M., ZHANG, X., XU, D., DENG, X. (2018): Redundancy-free UAV sensor fault isolation and recovery. *arXiv preprint*.

URBAN, R., STRONER, M., KREMEN, T., BRAUN J., MOESER, M. (2018): A novel approach to estimate systematic and random error of terrain derived from UAVs: a case study from a post-mining site. *Acta montanistica slovacica*. 2018. roč. 23, č. 3, s. 325–336. ISSN 13351788.

WALSH, S. B., BORRELO, D. J., GULDUR, B., HAJJAR, J. F. (2013): Data Processing of Point Clouds for Object Detection for Structural Engineering Applications. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*. 2013. roč. 28, s. 495–508.

WANG L., SONG, W., LIU, Z., LI, H. (2010): Airborne LiDAR strip adjustment based on LSM. *2010 3rd International Congress on Image and Signal Processing*, Yantai. 2010. s. 2727–2731.

WEHR, A., LOHR, U. (1999): Airborne laser scanning—an introduction and overview. *ISPRS Journal of photogrammetry and remote sensing*, roč. 54, č. 2–3, s. 68–82.

WOLF, P. R., GHILANI, CH. D. (1997): Adjustment Computations – Statistics and Least Squares in Surveying and GIS. John Wiley and Sohn, Inc., 564 stran.

YANG, Q., SUN, L. (2018): A fuzzy complementary Kalman filter based on visual and IMU data for UAV landing. *Optik*. 2018. roč. 173, s. 279–291. ISSN 00304026.

YANCHO, J. M. M., COOPS, N. C., TOMPALSKI, P., GOODBODY, T. R. H., PLOWRIGHT, A. (2019): Fine-Scale Spatial and Spectral Clustering of UAV-Acquired Digital Aerial Photogrammetric (DAP) Point Clouds for Individual Tree Crown Detection and Segmentation. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, IEEE Journal of, IEEE J. Sel. Top. Appl. Earth Observations Remote Sensing*. 2019. roč. 12, č. 10, s. 4131–4148. ISSN 19391404.

YILMAZ, V., KONAKOGLU, B., SERIFOGLU, C., GUNGOR, O., GOKALP, E. (2018): Image classification-based ground filtering of point clouds extracted from UAV-based aerial photos. *Geocarto international*. 2018. roč. 33, č. 3, s. 310–320. ISSN 10106049.

ZIEHER, T., BREMER, M., RUTZINGER, M., PFEIFFER, J., FRITZMANN, P., WICHMANN, V. (2019): Assessment of landslide-induced displacement and deformation of above-ground objects using UAV-borne and airborne laser scanning data. *ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing*. 2019. roč. 4, č. 2, s. 461–467. ISSN 21949042.

Pro tuto práci byla použita citační norma ČSN ISO 690:2011: Bibliografické citace.

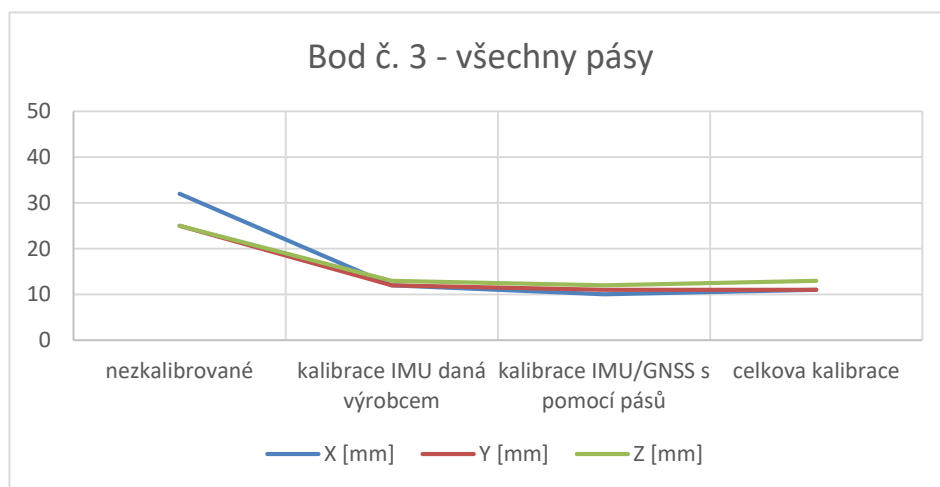
Přílohy práce

Kontrolní body – rezidua GNSS a všech pásů

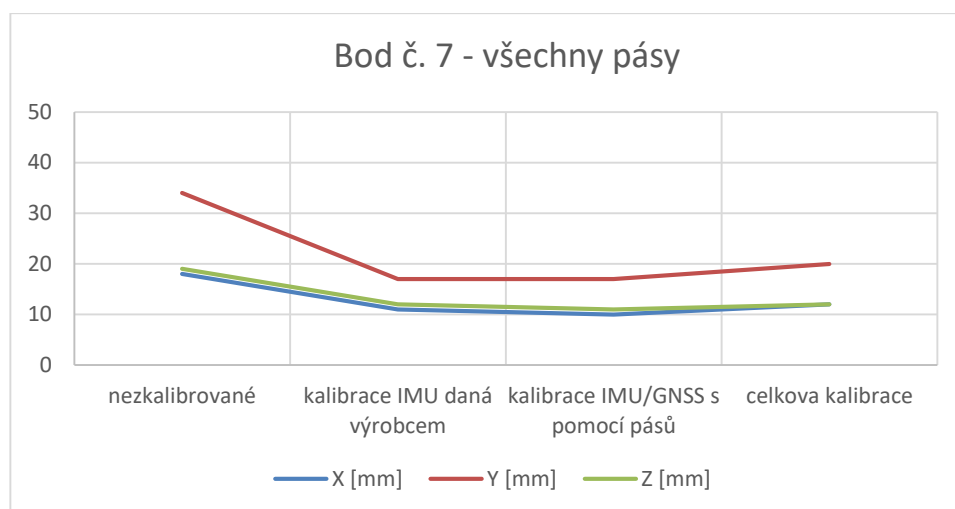
Všechny pásy - rezidua [mm]

číslo bodu	3	7	9	12	13
Nekalibrované bodové mračno	48	43	81	55	48
Kalibrace IMU daná výrobcem	21	24	64	40	33
Kalibrace IMU/GNSS s pomocí pásů	19	23	60	33	32
Celková kalibrace	20	26	61	35	33

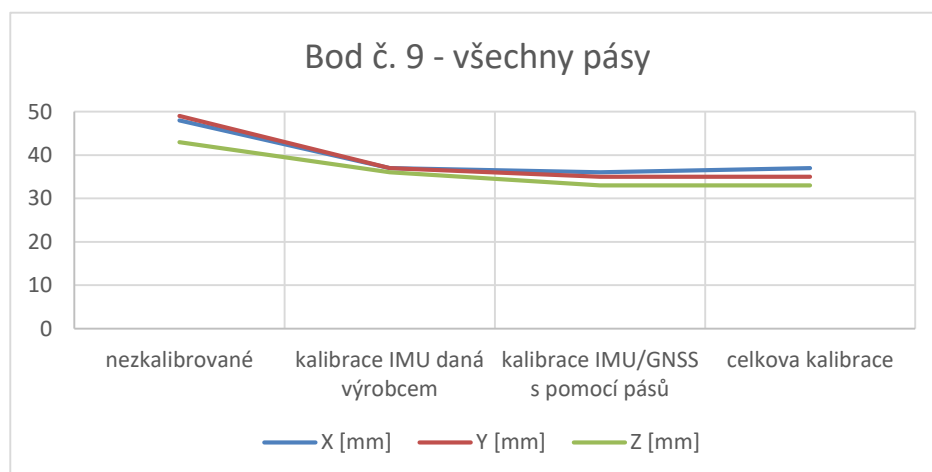
bod č. 3 - pro všechny pásy	X [mm]	Y [mm]	Z [mm]	Rezidua [mm]
Nekalibrované bodové mračno	32	25	25	48
Kalibrace IMU daná výrobcem	12	12	13	21
Kalibrace IMU/GNSS s pomocí pásů	10	11	12	19
Celková kalibrace	11	11	13	20



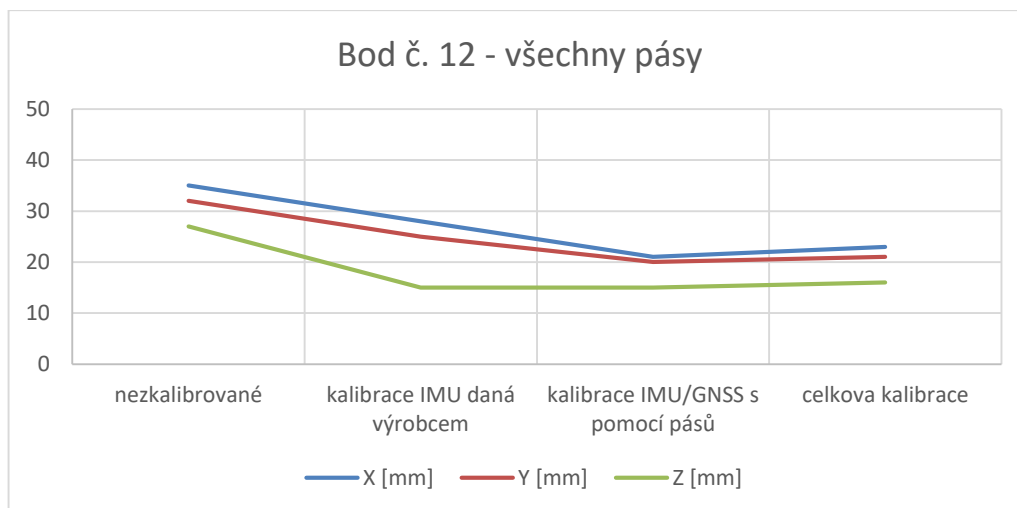
bod č. 7 - pro všechny pásy	X [mm]	Y [mm]	Z [mm]	Rezidua [mm]
Nekalibrované bodové mračno	18	34	19	43
Kalibrace IMU daná výrobcem	11	17	12	24
Kalibrace IMU/GNSS s pomocí pásů	10	17	11	23
Celková kalibrace	12	20	12	26



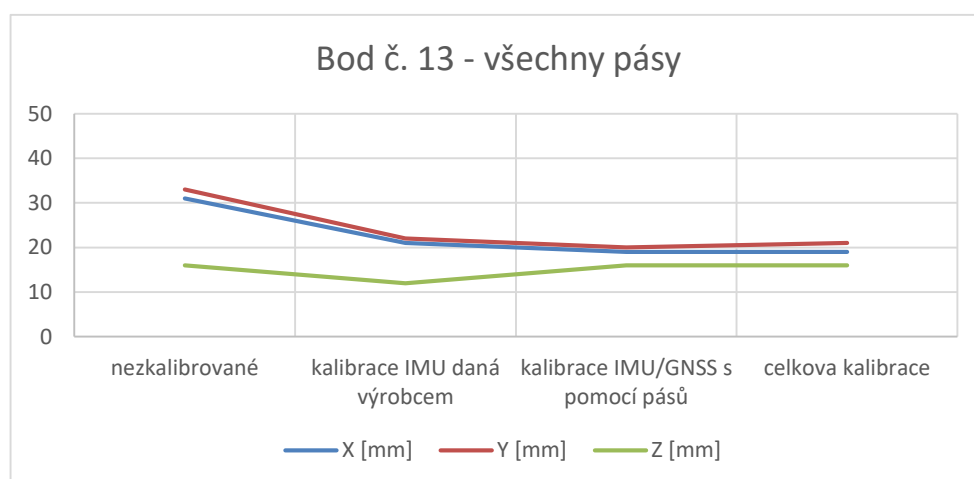
bod č. 9 - pro všechny pásy	X [mm]	Y [mm]	Z [mm]	Rezidua [mm]
Nekalibrované bodové mračno	48	49	43	81
Kalibrace IMU daná výrobcem	37	37	36	64
Kalibrace IMU/GNSS s pomocí pásů	36	35	33	60
Celková kalibrace	37	35	33	61



bod č. 12 - pro všechny pásy	X [mm]	Y [mm]	Z [mm]	Rezidua [mm]
Nekalibrované bodové mračno	35	32	27	55
Kalibrace IMU daná výrobcem	28	25	15	40
Kalibrace IMU/GNSS s pomocí pásů	21	20	15	33
Celková kalibrace	23	21	16	35



bod č. 13 - pro všechny pásy	X [mm]	Y [mm]	Z [mm]	Rezidua [mm]
Nekalibrované bodové mračno	31	33	16	48
Kalibrace IMU daná výrobcem	21	22	12	33
Kalibrace IMU/GNSS s pomocí pásů	19	20	16	32
Celková kalibrace	19	21	16	33



Kontrolní body – rezidua GNSS a kolmých pásů (kom. 1.)

Kolmé pásy – rezidua [mm]

číslo bodu	3	7	9	12	13
Nekalibrované bodové mračno	44	30	71	28	31
Kalibrace IMU daná výrobcem	30	25	50	10	15
Kalibrace IMU/GNSS s pomocí pásů	31	35	44	15	15
Celková kalibrace	32	26	48	12	16

bod č. 3 - pro kolmé pásy	X [mm]	Y [mm]	Z [mm]	Rezidua [mm]
Nekalibrované bodové mračno	26	30	20	44
Kalibrace IMU daná výrobcem	19	21	10	30
Kalibrace IMU/GNSS s pomocí pásů	18	24	9	31
Celková kalibrace	18	25	10	32

bod č. 7 - pro kolmé pásy	X [mm]	Y [mm]	Z [mm]	Rezidua [mm]
Nekalibrované bodové mračno	20	15	16	30
Kalibrace IMU daná výrobcem	19	10	12	25
Kalibrace IMU/GNSS s pomocí pásů	22	22	15	35
Celková kalibrace	18	8	17	26

bod č. 9 - pro kolmé pásy	X [mm]	Y [mm]	Z [mm]	Rezidua [mm]
Nekalibrované bodové mračno	35	47	40	71
Kalibrace IMU daná výrobcem	29	34	22	50
Kalibrace IMU/GNSS s pomocí pásů	26	30	19	44
Celková kalibrace	30	31	22	48

bod č. 12 - pro kolmé pásy	X [mm]	Y [mm]	Z [mm]	Rezidua [mm]
Nekalibrované bodové mračno	20	14	13	28
Kalibrace IMU daná výrobcem	8	5	4	10
Kalibrace IMU/GNSS s pomocí pásů	10	6	9	15
Celková kalibrace	9	6	4	12

bod č. 13 - pro kolmé pásy	X [mm]	Y [mm]	Z [mm]	Rezidua [mm]
Nekalibrované bodové mračno	14	25	13	31
Kalibrace IMU daná výrobcem	7	12	5	15
Kalibrace IMU/GNSS s pomocí pásů	8	11	6	15
Celková kalibrace	7	13	6	16

Kontrolní body – rezidua GNSS a příčných pásů (kom. 2.)

Příčné pásy – rezidua [mm]

číslo bodu	3	7	9	12	13
Nekalibrované bodové mračno	42	34	96	62	59
Kalibrace IMU daná výrobcem	30	35	71	31	60
Kalibrace IMU/GNSS s pomocí pásů	32	36	75	30	58
Celková kalibrace	32	39	75	30	59

bod č. 3 - pro příčné pásy	X [mm]	Y [mm]	Z [mm]	Rezidua [mm]
Nekalibrované bodové mračno	30	25	15	42
Kalibrace IMU daná výrobcem	19	20	11	30
Kalibrace IMU/GNSS s pomocí pásů	20	22	11	32
Celková kalibrace	19	23	11	32

bod č. 7 - pro příčné pásy	X [mm]	Y [mm]	Z [mm]	Rezidua [mm]
Nekalibrované bodové mračno	17	22	20	34
Kalibrace IMU daná výrobcem	17	23	20	35
Kalibrace IMU/GNSS s pomocí pásů	18	20	24	36
Celková kalibrace	22	23	22	39

bod č. 9 - pro příčné pásy	X [mm]	Y [mm]	Z [mm]	Rezidua [mm]
Nekalibrované bodové mračno	50	55	60	96
Kalibrace IMU daná výrobcem	42	45	36	71
Kalibrace IMU/GNSS s pomocí pásů	45	49	34	75
Celková kalibrace	42	50	36	75

bod č. 12 - pro příčné pásy	X [mm]	Y [mm]	Z [mm]	Rezidua [mm]
Nekalibrované bodové mračno	39	37	30	62
Kalibrace IMU daná výrobcem	20	19	15	31
Kalibrace IMU/GNSS s pomocí pásů	18	19	14	30
Celková kalibrace	19	17	15	30

bod č. 13 - pro příčné pásy	X [mm]	Y [mm]	Z [mm]	Rezidua [mm]
Nekalibrované bodové mračno	45	35	16	59
Kalibrace IMU daná výrobcem	50	31	13	60
Kalibrace IMU/GNSS s pomocí pásů	44	34	16	58
Celková kalibrace	46	33	15	59

Použitý software

Při zpracování této diplomové práce byly použity tyto softwary:

- Agisoft Metashape
- Atlas DMT
- AutoCAD Map 3D
- CloudCompare
- Cyclone 3DR
- Groma
- Infinity
- POSPac
- RealityCapture
- Riegl RiPROCESS

Použité přístroje

Při zpracování této diplomové práce byly použity tyto přístroje:

- Apple iPhone 11 64GB
- Leica GS16
- Leica MS60
- RIEGL miniVUX-1UAV